



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**Proposta de millora de l'assaig de durabilitat per a la caracterització de les roques argiloses alterables**

### Autor/a

Roc Polvoreda Ripoll

### Tutor/a

Jordi Corominas Dulcet i Joan Martínez-Bofill

### Departament

Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

### Intensificació

Enginyeria del Terreny

### Data

17/05/2013



## AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair al professor Joan Martínez-Bofill tot el seu temps, dedicació, interès i ajuda durant tota la tesina, des de les primeres sortides de camp fins a les últimes feines de redacció, així com per ficar a la meva disposició les instal·lacions de la seva empresa Geomar Enginyeria del Terreny, sempre que ho he sol·licitat. També agrair al professor Jordi Corominas l'oportunitat de participar en aquesta tesina, per orientar-me i per resoldre tots els dubtes que m'han anat sorgint al llarg de l'estudi, posant-hi sempre el màxim interès.

En segon lloc, agrair als meus pares tota la paciència i el suport incondicional que m'han donat durant tota la carrera, que em sembla que ha estat fora del que podia esperar.

També agrair especialment a Cristina l'ajuda oferta en els últims retocs de la tesina, amb el màxim entusiasme i afecte.

No em puc oblidar de donar les gràcies per l'ajuda rebuda als treballadors de l'empresa Geomar Enginyeria del Terreny, per les seves indicacions i bona predisposició durant els assajos allí realitzats. Gràcies Enrique, Clara i Ricard.

D'igual manera agrair als operaris del Servei de Làmina Prima de la Facultat de Geologia de la UB la feina realitzada i la facilitat oferta per a l'emmagatzematge de les mostres durant els assajos. Llavors donar les gràcies també a Jose i a Víctor, responsables del Laboratori del Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica de la UPC per la seva disponibilitat.

Mostrar també l'agraïment a la promotora de les obres de la C-25, Cedinsa, per facilitar-nos les tasques d'accés i aparcament prop dels talussos que es volien estudiar.

Per últim vull donar l'agraïment més sentit i especial a Marina, per tantes i tantes coses durant tots aquests anys de carrera. Per fer de companya, punt de suport, consellera, ajudant, amiga, cuinera ocasional, ... etc, etc, i per fer-ho des de l'estima més absoluta. Tu realment, eres la única persona que sap el que m'ha costat de veritat.



## RESUM

### **Proposta de millora de l'assaig de durabilitat per a la caracterització de les roques argiloses alterables**

**Autor:** Roc Polvoreda Ripoll

**Tutors:** Jordi Corominas Dulcet i Joan Martínez-Bofill

Les roques argiloses són uns materials geològics molt abundants, que presenten un comportament complex. És habitual haver de realitzar voladures per excavar roques argiloses i malgrat això, els talussos excavats poden ser altament susceptibles a la meteorització física, i disgregar-se fins i tot en períodes molt curts de temps, afectant tant a la seguretat com als costos de manteniment de carreteres i altres obres lineals. Tanmateix, aquest comportament no es pot generalitzar. Així, alguns talussos es mantenen pràcticament intactes durant anys, mentre que altres es degraden molt ràpidament.

L'assaig Slake Durability Test (SDT) és l'assaig estàndard de durabilitat de la International Society for Rock Mechanics (ISRM) per a caracteritzar les roques argiloses alterables. El principal problema que presenta l'assaig, és la falta de sensibilitat en el càlcul de la durabilitat de les roques que es degraden en fragments més grans que la malla del sedàs de l'SDT 2,0 mm. Aquests fragments llavors computen com a fracció retenguda i per tant donen valors de durabilitat més alts que els observats a les mateixes roques en el camp.

L'objectiu del present estudi, és proposar una millora quantitativa de la sensibilitat de l'assaig SDT basada en la distribució granulomètrica del material retengut al tambor després de l'assaig. Per això s'han caracteritzat mostres de diferents talussos, prèviament classificats (en 5 nivells) en funció de l'alteració de la seva superfície, per validar els índexs obtinguts en laboratori, i la seva capacitat per predir el comportament en obra, a mig i llarg termini.

S'ha realitzat una campanya de caracterització i classificació de camp de 10 talussos seleccionats, així com d'obtenció de mostres representatives per assajar-les. Les mostres obtingudes (17) s'han dividit en dos grups per ser assajades a l'SDT: el primer format per material intacte amb les condicions en les que es troba al camp i el segon amb un envelliment previ aconseguit mitjançant l'assaig de cicles gel-desgel. A partir d'aquí, s'aplicarà la millora proposada amb la realització d'unes granulometries per tamisat, que han servit per quantificar i corregir la fracció de roca degradada retenguda a l'SDT. Aquests resultats han estat contrastats amb la classificació de camp i el grau de degradabilitat obtingut en els talussos.

El resultat obtingut mostren que l'SDT no és suficient per ell mateix per predir el comportament dels talussos. Els millors resultats són amb 5 cicles en lloc de 2 i amb mostra envellida gel-desgel. Això permet distingir entre talussos tipus 3, 4 i 5. La correcció granulomètrica permet distingir entre talussos tipus 3 i 4 amb més claredat i permet a més a més albirar un principi de separació entre els tipus 2 i 3. Per tant la proposta de millora de l'SDT ajuda a preveure el comportament d'alguns dels materials analitzats. Aquesta informació serà útil per a la redacció de projectes d'enginyeria ubicats a zones amb aquests tipus de materials.

**Paraules clau:** Slake Durability Test, durabilitat, roques argiloses, talussos, envelliment gel-desgel, granulometria

## **ABSTRACT**

### **Durability test proposed improvement for the characterization of changeable clay rocks**

**Author:** Roc Polvoreda Ripoll

**Supervisors:** Jordi Corominas Dulcet and Joan Martínez-Bofill

The clay rocks are very abundant geological materials that show a complex behavior. It is common to have to make blasting to excavate clay rocks and despite that, the excavated slopes can be highly susceptible to physical weathering, and even to disintegrate in very short periods of time, affecting both the safety and the maintenance costs of roads and other linear works. However, this behavior cannot be generalized. Also, some slopes remain virtually intact over the years, while others degrade very quickly.

The Slake Durability Test (SDT) is the standard test for durability studies of the International Society for Rock Mechanics (ISRM) to characterize the changeable clay rocks. The main problem with the test, is the lack of sensitivity in the estimate of the durability for rocks which are degraded into larger fragments than the mesh of the SDT sieve of 2.0 mm. These fragments are then calculated as a retained fraction and therefore they give higher durability values than those observed in the same rocks at the field.

The target of this study is to propose a quantitative improvement of the sensitivity of the SDT test based on grain size distribution, of the material retained in the drum after the test. Therefore samples of different slopes were characterized, and previously classified (in 5 levels) based on the modification of its surface, to validate the obtained index at the laboratory, and its ability to predict the behavior at work, in a medium and long term.

A field campaign has been made for characterization and classification of 10 selected slopes, as well to obtain representative samples for testing them. The obtained (17) samples are divided into two groups to be tested to the SDT: the first one consisting of intact material with the conditions in which they are found at the field and the second one with a previous ageing achieved by freeze-thaw cycles test. From there, the proposed improvement will be applied with the completion of sieving granulometries, which served to quantify and correct the fraction of degraded rock retained the SDT. These results were contrasted with the field classification and degradability degree obtained from the slopes.

The results show that the SDT is not sufficient by itself to predict the behavior of slopes. The best results are with 5 cycles instead of 2 and with aged sample freeze-thaw. This allows to discriminate between 3,4 and 5 slope types. The granulometric correction allows discrimination between 3 and 4 slope types with more clarity and also allows a glimpse principle of separation between types 2 and 3. Therefore the proposed improved SDT helps to predict the behavior of some of the analyzed material. This information will be useful for writing engineering projects located in areas with this kind of materials.

**Keywords:** Slake Durability Test, durability, clay rocks, slopes, freeze-thaw ageing, granulometry

## ÍNDEX

0	ÍNDEX DE FIGURES I TAULES.....	9
1	INTRODUCCIÓ.....	13
2	ANTECEDENTS .....	16
2.1	SLAKE DURABILITY TEST .....	16
2.2	ALTRES ASSAJOS DE DURABILITAT .....	18
2.2.1	Assajos dinàmics.....	18
2.2.2	Assajos estàtics.....	19
2.2.3	Assajos d'envelliment.....	21
2.3	MÈTODES QUANTITATIUS DE CARACTERITZACIÓ DE LA DURABILITAT .....	24
2.3.1	Erguler, Z. A. & Shakoor, A. (2009) i el Desintegration Ratio .....	24
2.3.2	Martínez-Bofill, J. (2011) i l'índex SDT corregit .....	24
3	ÀREA D'ESTUDI .....	27
3.1	SITUACIÓ GEOGRÀFICA .....	27
3.2	CLIMATOLOGIA .....	27
3.3	GEOLOGIA .....	30
3.3.1	Estructura geològica general.....	30
3.3.2	Estratigrafia .....	32
3.3.3	Estructura geològica de la zona d'estudi.....	36
3.4	SITUACIÓ DELS TALUSSOS ESTUDIATS .....	39
4	METODOLOGIA.....	43
4.1	TREBALL DE CAMP .....	43
4.1.1	Descripció dels talussos i materials que els componen .....	43
4.1.2	Obtenció de les mostres.....	45
4.2	TREBALL AL LABORATORI .....	46
4.2.1	Preparació de les mostres .....	47
4.2.2	Slake durability test.....	48
4.2.3	Envelliment en cicles de gel-desgel.....	50
4.2.4	Granulometria per tamisat.....	52
4.3	CONCLUSIONS METODOLÒGIQUES .....	53
5	RESULTATS.....	55
5.1	RESULTATS DE CAMP .....	55

5.2	RESULTATS DE LABORATORI .....	59
5.2.1	Resultats de durabilitat en mostres intactes .....	59
5.2.2	Resultats de durabilitat de les mostres envellides en cicles gel-desgel.....	64
6	ANÀLISI I DISCUSSIÓ .....	74
6.1	ANÀLISI DE RESULTATS DE LES MOSTRES ASSAJADES .....	74
6.1.1	Anàlisi de la durabilitat per a les mostres intactes .....	74
6.1.2	Anàlisi de la durabilitat per a les mostres envellides amb gel-desgel.....	78
6.2	COMPARACIÓ DE RESULTATS AMB LES MOSTRES PROVINENTS D'EUSKADI .....	81
6.2.1	Anàlisi de la durabilitat per a les mostres intactes d'Euskadi .....	81
6.2.2	Anàlisi de la durabilitat per a les mostres d'Euskadi envellides amb cicles gel-desgel .....	84
6.3	UN ALTRE ÍNDEX QUANTITATIU DE DURABILITAT: EL DESINTEGRATION RATIO .....	87
7	CONCLUSIONS .....	92
8	FUTURES LÍNIES DE RECERCA .....	95
9	BIBLIOGRAFIA .....	97



## 0 ÍNDEX DE FIGURES I TAULES

### TAULES

<b>Taula 2-1.</b> Classificació dels materials a l'assaig JST en funció de la seva reacció a la immersió en aigua. ....	20
<b>Taula 2-2.</b> Proposta de classificació de talussos en funció de la degradació a mitjà termini de la superfície excavada. Martínez-Bofill (2011). ....	26
<b>Taula 3-1.</b> Dades dels talussos estudiats .....	40
<b>Taula 5-1.</b> Classificació de les mostres segons la tipologia de talús. ....	56
<b>Taula 5-2.</b> Quantificació del nombre de talussos per a cada categoria de talús. ....	57
<b>Taula 5-3.</b> Resultats de l'assaig de durabilitat SDT de les mostres intactes per a cada cicle d'assaig. ....	60
<b>Taula 5-4.</b> Nombre de mostres per a cada categoria de durabilitat segons el valor d'Id5. Martínez-Bofill (2011). ....	61
<b>Taula 5-5.</b> Valors de durabilitat Id5 corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 2,0mm i 10,0mm. ....	62
<b>Taula 5-6.</b> Valors de durabilitat Id5 corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 12,5mm i 20,0mm. ....	63
<b>Taula 5-7.</b> Percentatges de pèrdua en pes total després dels cicles de gel-desgel. ....	68
<b>Taula 5-8.</b> Percentatge de pèrdua de material tamisat amb el sedàs de 2,0mm, després dels cicles gel-desgel. ....	69
<b>Taula 5-9.</b> Resultats dels índex de durabilitat als diferents cicles realitzats i correcció de l'Id5 (Id5 envellit). ....	70
<b>Taula 5-10.</b> Quantificació del nombre de mostres per a cada interval del grau de durabilitat. Martínez-Bofill, J. (2011). ....	71
<b>Taula 5-11.</b> Valors de durabilitat Id5 corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 2,0mm i 10,0mm, per a mostres envellides. ....	72
<b>Taula 5-12.</b> Valors de durabilitat Id5 corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 12,5mm i 20,0mm, per a mostres envellides. ....	73
<b>Taula 6-1.</b> Valors de durabilitat Id5 per a les mostres intactes d'Euskadi, corregides segons el percentatge de fracció que passa pel sedàs UNE 10,0mm i 12,5mm, amb tipologia de talussos. ....	81
<b>Taula 6-2.</b> Valors de durabilitat Id5 per a les mostres envellides d'Euskadi, corregides segons el percentatge de fracció que passa pel sedàs UNE 10,0mm i 12,5mm, amb tipologia de talussos. ....	85
<b>Taula 6-3.</b> DR calculats per a les mostres intactes i envellides amb tipologia de talús inclosa. ....	89
<b>Taula 6-4.</b> DR calculats per a les mostres intactes i envellides d'Euskadi, amb tipologia de talús inclosa. ....	90

### GRÀFIQUES

<b>Gràfica 5-1.</b> Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes. ....	61
--	----

<b>Gràfica 5-2.</b> Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes, afegint la correcció al valor Id5 per 2,0mm (cicle 6), 10,0mm (cicle 7), 12,5mm (cicle 8) i 20,0mm (cicle 9). .....	64
<b>Gràfica 5-3.</b> Representació del valor mesurat de durabilitat per a cada cicle d'assaig de desgast amb SDT, i valors de l'Id5 envellit (cicle 6). .....	71
<b>Gràfica 5-4.</b> Representació de la distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, en les mostres envellides, afegint la correcció de l'Id5 envellit (cicle 6) i la correcció al valor Id5 per 2,0 mm (cicle 7), 10,0 mm(cicle 8), 12,5 mm (cicle 9) i 20,0 mm (cicle 10). .....	73
<b>Gràfica 6-1.</b> Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos per a les mostres intactes. ....	75
<b>Gràfica 6-2.</b> Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 10,0mm, respecte a la tipologia de talús. ....	76
<b>Gràfica 6-3.</b> Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 12,5mm, respecte a la tipologia de talús. ....	76
<b>Gràfica 6-4.</b> Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes, afegint la correcció al valor Id5 per 2,0mm (cicle 6), 10,0mm (cicle 7), 12,5mm (cicle 8) i 20,0mm (cicle 9). Les corbes estan classificades per tipologia de talús. ....	77
<b>Gràfica 6-5.</b> Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos, per a les mostres envellides. ....	78
<b>Gràfica 6-6.</b> Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 10,0mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres envellides. ....	79
<b>Gràfica 6-7.</b> Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 12,5mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres envellides. ....	79
<b>Gràfica 6-8.</b> Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres envellides, afegint la correcció al valor Id5 respecte a la mostra inicial Id5 envellit (cicle 6), i les correccions per 2,0mm (cicle 7), 10,0mm (cicle 8), 12,5mm (cicle 9) i 20,0mm (cicle 10). Les corbes estan classificades per tipologia de talús. ....	80
<b>Gràfica 6-9.</b> Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos, per a les mostres intactes d'Euskadi. ....	82
<b>Gràfica 6-11.</b> Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 12,5mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres intactes d'Euskadi. ....	83
<b>Gràfica 6-10.</b> Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 10,0mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres intactes d'Euskadi. ....	83
<b>Gràfica 6-12.</b> Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes d'Euskadi, afegint la correcció al valor Id5 per 2,0mm (cicle 6), 10,0mm (cicle 7), 12,5mm (cicle 8) i 20,0mm (cicle 9). Les corbes estan classificades per tipologia de talús... 84	84
<b>Gràfica 6-13.</b> Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos, per a les mostres envellides d'Euskadi. ....	86
<b>Gràfica 6-14.</b> Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres envellides d'Euskadi, afegint la correcció al valor Id5 respecte a la mostra inicial Id5 envellit (cicle 6), i les correccions per 2,0mm (cicle 7), 10,0mm (cicle 8), 12,5mm (cicle 9) i 20,0mm (cicle 10). Les corbes estan classificades per tipologia de talús. ....	87
<b>Gràfica 6-15.</b> Comparació entre les gràfiques del retengut acumulat per a la mostra Avinyó 1.1. ....	88

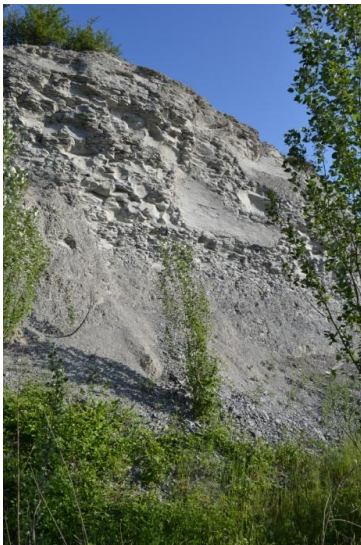
## FIGURES

<b>Figura 1-1.</b> Talús alterat però estable. ....	13
<b>Figura 1-2.</b> Talús amb formació de sostres. ....	13
<b>Figura 1-3.</b> Aparició de bonys als terraplens de la C-25 en un tram de 3 km entre les poblacions d'Aguilar de Segarra i Rajadell, durant el mes d'abril de 2013. ....	14
<b>Figura 2-1.</b> Esquema i dimensions de l'aparell Slake Durability Test. ASTM D4644 (1987). ....	16
<b>Figura 3-1.</b> Divisió climàtica de Catalunya, i situació de la zona d'estudi al cercle vermell. SMC (2013). ....	29
<b>Figura 3-2.</b> Mapa geològic estructural de Catalunya i situació de la zona d'estudi. HNPC (1992). ....	31
<b>Figura 3-3.</b> Contacte entre els guixos de la formació de la Noguera, i les margues blaves del membre Vespella de la formació Margues de Vic. Talús situat a prop de la localitat de Gurb..	38
<b>Figura 3-4.</b> Formació de sostres al degradar-se els estrats més tous de material vermellós de la formació d'Artés. Talús a la C-25. ....	39
<b>Figura 3-5.</b> Mapa topogràfic de Catalunya 1:500.000, amb els talussos situats amb marcadors verds. ICC (2002). ....	40
<b>Figura 3-6.</b> Mapa geològic de Catalunya 1:500.000, amb els talussos situats. ICC (2002). ....	41
<b>Figura 3-7.</b> Llegenda del mapa geològic de Catalunya 1:500.000. Els talussos Olost 1, Oristà 1, Avinyó 1 i Fontfreda 1, es classificaran com a materials G a la llegenda. ICC (2002). ....	41
<b>Figura 3-8.</b> Llegenda del mapa geològic de Catalunya 1:500.000. Els talussos Tona 1, Gurb 1, Vic 2, Vic 3 i Gurb 2, es classificaran com a materials A a la llegenda. ICC (2002). ....	41
<b>Figura 3-9.</b> Mapa geològic de Catalunya 1:50.000, amb els talussos situats. ICC (2002). ....	41
<b>Figura 3-10.</b> Unitats geològiques de la llegenda del mapa geològic de Catalunya 1:50.000, presents als talussos estudiats. ICC (2002). ....	42
<b>Figura 4-1.</b> Marcat de les llesques sobre les pedres extreïdes dels talussos, per a ser serrades al servei de làmina prima a la Facultat de Geologia de la UB. ....	47
<b>Figura 4-2.</b> Serrat de mostres a Geomar, per preparar els cubs a assajar. ....	48
<b>Figura 5-1.</b> Talús pràcticament vertical amb taladres de voladura perfectament conservades i absència d'erosió superficial. Mostra Vic 2.4. ....	57
<b>Figura 5-2.</b> Talús de roca lleugerament meteoritzada. Les arestes s'arrodoneixen amb el temps. Mostra Vic 2.3. ....	57
<b>Figura 5-3.</b> Talús amb roca meteoritzada a la superfície amb aparició de disjunció nodular i lliscament per fractura lística. Mostra Tona 1.2. ....	58
<b>Figura 5-4.</b> Talús recobert per una capa de regòlit d'aspecte terrós amb esquerdes superficials i formació de xaragalls. Mostra Gurb 2.1. ....	58
<b>Figura 5-5.</b> L'estrat format per lutites argiloses s'ha de classificar com a tipus V, ja que presenta una capa de regòlit important i no apareixen afloraments de roca. Això es degut a que està format per dipòsits argilosos poc consolidats. Mostra Oristà 1.1. ....	59
<b>Figura 5-6.</b> Aspecte de les mostres Vic 2.1 i Gurb 2.1 després de submergir-les en alcohol isopropílic. ....	65
<b>Figura 5-7.</b> Aspecte de la mostra Fontfreda 1.1 després de submergir-la en alcohol isopropílic. ....	65
<b>Figura 5-8.</b> Mostra fracturada en trossos grans després dels cicles de gel-desgel. ....	66
<b>Figura 5-9.</b> Mostra pràcticament intacta després dels cicles de gel-desgel. ....	66

<b>Figura 5-10.</b> Mostra trencada en trossos en forma de “xips” després dels cicles gel-desgel.....	67
<b>Figura 5-11.</b> Mostra molt desfeta després dels cicles de gel-desgel. ....	68
<b>Figura 8-1.</b> Classificació Petroològica-Textural de les Roques Detrítiques Sorrenques i Lutítiques. Martínez-Bofill, J. (2011). ....	96

## **1 INTRODUCCIÓ**

Les infraestructures que travessen zones amb roques argiloses alterables (lutites, argilites, limolites, margues...) presenten talussos que generalment necessiten ser excavats amb mitjans mecànics o inclús amb voladures en molt casos. Tot i aquestes dificultats en el moment de ser excavats, aquests materials poden evolucionar perdent les seves propietats resistents i durables al cap de pocs anys o fins i tot mesos, exhibint un grau de degradació elevat i produint-se l'erosió diferencial dels nivells tous respecte dels nivells cimentats, o bé l'engrunament progressiu de la cara lliure del talús. No obstant el comportament no és el mateix a tots els talussos (figura 1-1 i figura 1-2), ja que alguns mantenen la seva forma i l'estabilitat durant molt temps. En la pràctica, la predicció de l'alterabilitat d'aquests materials no és evident, ni previsible d'una manera senzilla.



**Figura 1-1.** Talús alterat però estable.



**Figura 1-2.** Talús amb formació de sostres.

La conseqüència directa d'aquests processos és el desprendiment de terres i la caiguda de blocs als desmunts i assentaments i deformacions als terraplens (figura1-3). Això suposa un risc per a la seguretat vial i un manteniment costós i car. Per tant serà de gran utilitat tota informació que ajudi a caracteritzar les diferents tipologies de materials i així l'enginyer podrà saber quines mesures haurà de prendre, tant per a la redacció de nous projectes com per a la conservació als projectes ja executats.



**Figura 1-3.** Aparició de bonys als terraplens de la C-25 en un tram de 3 km entre les poblacions d'Aguilar de Segarra i Rajadell, durant el mes d'abril de 2013.

Per obtenir dades sobre la durabilitat de les roques argiloses, l'Slake Durability Test (SDT) és l'assaig estàndard de la International Society for Rock Mechanics (ISRM), sent el mètode més utilitzat entre altres aspectes per que és senzill i té un cost d'execució baix. Però l'SDT presenta algunes carències, principalment en torn a dos punts: el nombre de cicles a assajar cadascuna de les mostres i la falta de sensibilitat per a determinar la durabilitat en algunes roques. Aquesta manca de precisió és deguda a que l'assaig comptabilitza com a fracció no degradable del material, aquella que queda retinguda pel sedàs d'obertura UNE 2,0mm, propi de l'aparell. Tota mostra que es trenqui o degradi en fragments més grans, obtindrà un valor de durabilitat sobrevalorat que no correspondrà en absolut amb la degradació revelada al camp.

Així doncs l'objectiu de la tesina és fer una proposta de millora de l'assaig SDT basada en la correcció granulomètrica de la fracció retinguda per la malla de 2,0 mm de l'equip, i així millorar la capacitat predictiva d'aquest assaig en el comportament dels materials en obra. Amb aquesta finalitat s'han realitzat tot un seguit de treballs.

En primer lloc al capítol 2, s'ha realitzat una recerca bibliogràfica sobre els estudis anteriors a la tesina que també han proposat millores per a l'SDT. Seguidament s'han descrit tant la geografia com la climatologia i la geologia de la zona (factors a tenir en compte en el procés de degradació de les roques argiloses), al capítol 3. A continuació als capítols 4 i 5 s'han descrit els procediments de treball seguits al camp i al laboratori i s'han presentat els resultats corresponents. Per últim, s'ha fet un anàlisi sobre aquets resultats i s'han extrets les conclusions pertinents, acabant la tesina amb

unes recomanacions per a futurs estudis que tinguin per objectiu aprofundir en el tema.

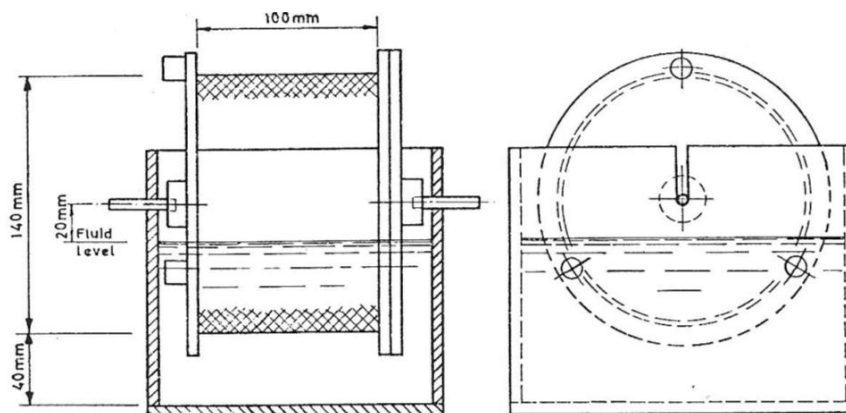
## 2 ANTECEDENTS

Un cop introduït el tema que ens ocupa i vistos els diferents punts a tractar durant la tesina, s'exposaran els estudis previs per conèixer la situació actual i les tècniques relacionades. Aquest capítol és fonamental per a explicar les aportacions que es realitzaran a l'estat de coneixement actual.

Existeixen un gran nombre d'assajos utilitzats per a determinar de manera directa o indirecta la durabilitat de les roques i es poden separar en dues categories: dinàmics o estàtics.

### 2.1 SLAKE DURABILITY TEST

L'Slake Durability Test (SDT) és un assaig dinàmic, que va ser dissenyat per Franklin & Chandra (1972) i actualment és l'assaig estàndard de l'International Society for Rock Mechanics per a mesurar la durabilitat a l'engrunament de les roques de gra fi. El procediment d'assaig es descriu detalladament en la norma ASTM D4644 (1987) i a l'estat espanyol la norma de referència és la NLT-251/91. Bàsicament l'assaig consisteix en mesurar la pèrdua de material quan es sotmet a diferents cicles d'assaig. La mostra utilitzada són 10 fragments de roca, de morfologia aproximadament esferoïdal o equidimensional. Els fragments deuen pesar entre 40 i 60 g, i s'emplacen dins d'un tambor amb una malla perimetral normalitzada de 2 mm d'obertura, que està parcialment submergida en aigua, com s'observa a la figura 2-1. Cada cicle consisteix en fer girar el tambor axialment durant 10 minuts a una velocitat de 20 rpm.



**Figura 2-1.** Esquema i dimensions de l'aparell Slake Durability Test. ASTM D4644 (1987).



El valor o índex de durabilitat  $Id(x)$  obtingut en cada cicle, corresponent al percentatge de material retingut després d'assecar-ho en estufa respecte la mostra inicial.

L'àmplia utilització del SDT ha generat una quantitat notable de bibliografia on es valora la experiència d'utilització d'aquest mètode, es discuteixen les avantatges i desavantatges d'aquest assaig, i també es realitzen suggeriments sobre el mètode de treball i/o possibles modificacions.

Així doncs, la principal discussió en l'ús de l'SDT recau en el nombre de cicles d'assaig. Diversos autors indiquen que la realització de sols 2 cicles d'assaig no ofereix suficients garanties per a valorar la durabilitat de les roques toves.

Gokçeöglu, C. et al. (2000) han estudiat la influència del nombre de cicles en SDT, conclouent que dos cicles no són suficients i que cal un nombre major per a representar la durabilitat a l'engrunament de les roques argiloses, recomanant la realització de 4 cicles.

Un altre dels inconvenients de l'assaig SDT ve relacionat amb la seva falta de sensibilitat, ja que la malla de 2 mm dona poca indicació del temps i quantitat de ruptura del material.

Czereweko, M.A.; Cripps, J.C., (2001), remarquen aquesta falta de sensibilitat, especialment en aquelles roques que s'engrunen en fragments petits, però amb un diàmetre superior a 2 mm. Miscevic, P & Vlastelica, G (2011) observen mostres de margues que s'engrunen al cap de 2 cicles d'assaig, i que presenten no obstant això un elevat valor de durabilitat, a causa de que es fragmenten en partícules majors de 2 mm.

Koncagul & Santi (1999), Gokceoglu et al, (2000), Sadisun et al. (2005), indiquen que el SDT no és útil per a la caracterització de la durabilitat d'aquelles roques que es fragmenten en partícules de més de 2 mm de grandària.

Una limitació important del SDT és la preparació i utilització de mostres de forma aproximadament esfèrica, i costats arrodonits. Això és particularment difícil quan s'han que assajar materials laminats o amb foliació (Czereweko & Cripps, 2001)

Segons Czereweko & Cripps (2001) l'assaig SDT és massa agressiu per a caracteritzar els materials de baixa durabilitat, i no sempre identifica els materials problemàtics. Proposen l'ús de l'assaig Jar Slake Modificado (JSM) per la seva senzillesa per a caracteritzar lutites, i per que s'obté una millor avaluació del potencial d'engrunament de les mostres.

## 2.2 ALTRES ASSAJOS DE DURABILITAT

### 2.2.1 Assajos dinàmics

Existeixen altres assajos dinàmics, però estan enfocats a la caracterització dels materials per al seu ús com a material de construcció. Per tant, són assajos en general massa agressius, especialment per a roques argiloses, i en conseqüència el seu ús és molt limitat, quasi testimonial. Els principals assajos es descriuen a continuació.

#### 2.2.1.1 Assaig Micro-Deval

L'assaig de resistència al desgast o assaig Micro-Deval, segueix un procediment que està estandarditzat i es detalla en la norma ASTM D6928-03 i la norma de referència UNE-EN 1097-1:1997. L'assaig consisteix en mesurar el desgast produït, baix condicions ben definides, per la fricció entre els àrids amb una càrrega abrasiva dins d'un cilindre en rotació. S'utilitzen 500 g de mostra amb una granulometria entre 10 i 14 mm, en un tambor tancat amb boles d'acer fins a un pes de 5000 g. S'afegeixen 2,5 l d'aigua i es fa rotar el tambor a una velocitat de 100 rpm, fins a realitzar 12000 voltes. Quan acaba la rotació, es calcula el coeficient Micro-Deval a partir del percentatge d'àrid retingut per el sedàs de 1,6 mm. Aquest assaig es pot accelerar amb una solució de sulfat sòdic, i també es pot realitzar en sec. Un baix valor de coeficient Micro-Deval indica una millor resistència al desgast. És un assaig massa abrasiu per a ser utilitzat en roques toves i argiloses. Normalment s'utilitza per a caracteritzar àrids per al seu ús en formigons, o en capes de rodadura.

#### 2.2.1.2 Assaig de resistència a l'abrasió o Assaig Los Angeles

L'assaig Los Angeles, també es denomina Assaig de Resistència a la Fragmentació. És un assaig desenvolupat per a mesurar la resistència dels àrids a

utilitzar en la construcció de carreteres. El mètode d'assaig es descriu en la norma ASTM C131-01 i UNE-EN 1097-2:1999.

Aquest equip es compon d'un tambor cilíndric buit d'acer de 500 mm de longitud i 700 mm de diàmetre aproximadament, amb el seu eix horitzontal fixat a un dispositiu exterior que pot transmetre-li un moviment de rotació al voltant de l'eix. El tambor té una obertura de tancament hermètic, per a la introducció del material d'assaig i de la càrrega abrasiva. Aquesta càrrega abrasiva consisteix en esferes de fosa o d'acer d'uns 48 mm de diàmetre i entre 390 i 445 grams de massa, la quantitat del qual depèn del material que s'assaja.

L'assaig consisteix bàsicament en col·locar una quantitat especificada d'àrid, de grandària major de 19 mm, dins d'un tambor cilíndric d'acer que està muntat horitzontalment. S'afegeix una càrrega de boles d'acer i es fa rotar el tambor a una velocitat d'entre 31 i 33 rpm, fins a realitzar 500 voltes.

El xoc entre l'àrid i les boles dona per resultat l'abrasió i els efectes es mesuren per la diferència entre la massa inicial de la mostra seca i la massa del material desgastat expressant-ho com percentatge inicial, segons l'equació 2-1.

$$\text{Percentatge de desgast} = (P_a - P_b)/P_a \quad \text{Equació 2-1}$$

On:  $P_a$  és la massa de la mostra seca abans de l'assaig (g)

$P_b$  és la massa de la mostra seca després de l'assaig, rentada sobre el sedàs 1,68mm.

Aquest assaig, malgrat la seva àmplia utilització per a la caracterització d'àrids, no s'utilitza en la caracterització de roques toves i argiloses, ja que és massa agressiu.

## **2.2.2 Assajos estàtics**

### **2.2.2.1 Jar Slake Test (JST)**

El Jar Slake Test o Assaig de Durabilitat a la Immersió té l'objectiu de millorar la falta de sensibilitat del Slake Durability Test. Aquest és un assaig estàtic que consisteix en submergir en aigua durant 24 hores un fragment irregular de lutita, prèviament assecat en estufa. La quantitat necessària de mostra és un fragment d'uns 20 g. Durant el període d'assaig s'apunten els canvis observats en la mostra, en intervals freqüents

en l'inici de l'assaig, i menys freqüents cap al final. La descripció i valoració de les mostres es fa d'acord a 6 categories mostrades a la taula 2-1.

**Taula 2-1.** Classificació dels materials a l'assaig JST en funció de la seva reacció a la immersió en aigua.

Valor de JST	Comportament
1	Es degrada a fang o un acumulat d'escates
2	Trenca ràpidament, forma abundants estelles
3	trenca lentament, forma algunes estelles
4	Trenca ràpidament, forma algunes fractures
5	Trenca lentament, desenvolupen poques fractures
6	Sense canvis

Una de les avantatges d'aquests assajos estàtics és que són més fàcils i ràpids de realitzar que el Slake Durability Test (Czereweko & Cripps, 2001).

#### 2.2.2.2 Estabilitat dels Àrids i Roques enfront de l'acció de l'aigua

Aquest assaig té per objectiu determinar la resistència a la desintegració dels àrids i fragments de roca per l'acció de la immersió en aigua. El mètode detallat d'assaig està normalitzat i es descriu en la norma NLT-255/99, i s'utilitza per a obtenir informació sobre el comportament dels materials enfront a l'acció dels agents atmosfèrics. L'assaig consisteix en prendre la mostra seca, assecar-la en estufa a  $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  i pesar-la per a conèixer el pes sec total de la mostra. Una vegada pesada, es separen les diferents fraccions mitjançant tamisat i es determina el pes retingut en cada sedàs. La sèrie de sedassos a utilitzar és la següent: 40, 20, 10, 5,0, 2,5, 1,25, 0.63, 0,32 i  $<0,320$ . Les mostres es submergeixen en aigua durant un període de temps entre 24 i 48 hores, a una temperatura de  $21^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$  procurant que el nivell de l'aigua quedi al menys 13 mm per sobre de les mostres. Després del període d'immersió, es retiren les mostres, es deixen escórrer i es sequen en estufa a  $105^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  fins a massa constant. Una vegada les mostres estan seques i a temperatura ambient, es pesen de nou i es procedeix a un nou cicle d'immersió. Es sequen de nou les mostres, i una vegada a temperatura ambient, es torna a tamisar cada fracció sobre el mateix sedàs en que va ser retingut abans de l'assaig. Les partícules amb grandàries superiores a 20 mm s'examinen qualitativament després de cada immersió, es realitza una fotografia abans i després de l'assaig i es redacta una petita descripció de l'estat de la mostra abans i després de la immersió. Una vegada completat el tamisat es determina la

pèrdua mitjana de material, calculada per mig del tant per cent de pèrdua de cada fracció, tenint en compte la granulometria del material original.

#### 2.2.2.3 Slake Index Test

En aquest assaig, la mostra consisteix en 6 fragments de roca amb una massa entre 100 i 150 g. Cada fragment es disposa en una cubeta i es sequen en estufa a 105°C fins a massa constant. Una vegada sec, es refreden a temperatura de laboratori, es pesen i es submergeixen procurant que queden cobertes al menys per 10 mm d'aigua. Després d'un interval de 12-16 hores d'immersió, les mostres de cada cubeta es renten i tamisen utilitzant el sedàs de 2 mm d'obertura. El material retingut en el sedàs es posa de nou en la cubeta i es seca fins a massa constant. El Slake Index Value (Is) de cada cicle, correspon al valor mig del percentatge de massa perduda de cada fragment respecte la mostra inicial, segons l'equació 2-2.

$$Is = \frac{Wx - Wx'}{Wx - B} \times 100 \quad \text{Equació 2-2}$$

On: Wx és la massa total de les 6 cubetes i el material assecat.

Wx' és la massa total de les 6 cubetes i el material assecat retingut pel sedàs de 2,0mm.

B és la massa total de les 6 cubetes.

#### 2.2.3 Assajos d'envelliment

Els assajos d'envelliment estan dissenyats per a intentar reproduir en condicions de laboratori l'efecte dels agents meteòrics sobre les roques. Existeixen diversos mètodes d'assaig que intenten reproduir diverses condicions.

##### 2.2.3.1 Envelliment en condicions de gel-desgel

Aquest assaig avalua la variació de resistència de les roques quan estan sotmeses a cicles successius de congelació. El procediment d'assaig està estandarditzat i es recull en la norma ASTM D5312-92 i la norma espanyola UNE EN 14617-5:2005. El resultat d'aquest assaig no dona un valor absolut de durabilitat, sinó una indicació de la resistència als cicles de gel-desgel. L'assaig consisteix en realitzar cicles diaris de congelació en mostres que prèviament han estat submergides durant un període

mínim de 12 hores en una solució al 0,5% d'alcohol isopropil en aigua destil·lada. Posteriorment es decanta la solució i s'inicien els cicles de gelada, introduint les mostres en un congelador frigorífic a  $-18^{\circ} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$  per un mínim de 12 hores (no hi ha límit superior d'emmagatzematge en la fase de congelació). Una vegada completa la fase de congelació, posar a descongelar la cubeta i la mostra a una temperatura de  $32^{\circ} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$  per un mínim de 8 hores i un màxim de 12 hores.

El nombre de cicles a realitzar es determina en base a les condicions de severitat de l'àrea geogràfica on es posaran les roques en servei. La norma ASTM D5312 recomana seleccionar el nombre de cicles en base a un mapa de severitat al gel-desgel, com l'elaborat per Lienhart (1988). Aquest autor estudia els factors que afecten a aquest envelliment, que serien l'aigua absorbida, l'aigua adsorbida, els dies de temperatura màxima de  $0^{\circ}\text{C}$  i inferior, dies de temperatura mínima  $0^{\circ}\text{C}$  i inferior, amb l'objectiu de conèixer el nombre de dies de gelada. La presència d'humitat és important ja que contribueix a accelerar el procés de fracturació de les roques. En base als paràmetres mencionats, i utilitzant dades obtingudes d'estacions meteorològiques, aquest autor proposa la realització d'un mapa de severitat al gel-desgel.

#### 2.2.3.2 *Envelliment en condicions d'humitat-assecat*

L'assaig consisteix en sotmetre les mostres a cicles diaris d'humitat-assecat. Normalment s'utilitza una càmera d'humitat-assecat, programada per a realitzar automàticament cicles de 12 hores d'humitat i 12 hores d'assecat. En cas de no disposar d'una càmera automàtica, els cicles es poden fer manualment, posant les mostres 12 hores en una càmera humida i 12 hores d'assecat en una estufa o en una planxa a l'aire lliure que manté les mostres disposades a una temperatura constant i permet el seu secat. La càmera humida deu tenir una capacitat suficient per a les mostres i els seus contenidors, mantenint una humitat constant del 95%.

Abans de la realització de l'assaig es sequen les mostres fins a massa constant ( $\pm 0,1\%$  de la massa total), a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$  i s'anota el pes de cada mostra. S'examina cada fragment de mostra, macro i microscòpicament amb un mínim de 20 augments, anotant la presència de plans d'estratificació, fractures i altres plans de debilitat. Durant la realització de l'assaig s'anoten els diferents cicles i les observacions a cada

moment. En cada cicle d'humitat-assecat les mostres es polvoritzen amb aigua per a que el procés d'humectació es produeixi de la forma més ràpida possible. Una vegada finalitzats els 15 cicles d'humitat-assecat, les mostres es descriuen, es fotografien i es tornen a pesar amb una precisió del 0,1 % de la massa total. Es calcula el tant per cent de pèrdua de massa després de 15 cicles.

#### 2.2.3.3 Envelliment en condicions de fred-calor

A l'assaig d'envelliment en condicions de fred-calor també se li coneix com a assaig d'envelliment per xoc tèrmic. El procediment de l'assaig està estandarditzat segons la norma espanyola UNE EN 14066:2003, i bàsicament consisteix en sotmetre les mostres a sobtats canvis de temperatura de manera cíclica (de -70°C a 250°C), amb la finalitat d'observar possibles dilatacions, deformacions o trencaments. Per a això s'utilitza una càmera especial amb dos compartiments, un de fred i un altre de calor, comunicats mitjançant una plataforma mòbil. La translació de la plataforma es realitza mitjançant un accionament neumàtic sent el pas entre compartiments d'uns pocs segons. Abans de la realització de l'assaig es sequen les mostres fins a massa constant i s'anota el pes de cada mostra. S'examina cada fragment de mostra, anotant la presència de plans d'estratificació, fractures i altres plans de debilitat. Durant la realització de l'assaig s'anoten els diferents cicles i les observacions a cada moment. Una vegada finalitzats els cicles previstos, les mostres es descriuen, es fotografien i es tornen a pesar amb una precisió del 0,1 % de la massa total, calculant el tant per cent de pèrdua de massa.

#### 2.2.3.4 Assaig de Resistència al Sulfat de Magnesí (Soundness Test)

Aquest assaig permet estimar la resistència a la meteorització dels àrids, especialment per al seu ús en formigó. El mètode es descriu detalladament en la norma ASTM C88 – 05, i la norma UNE EN 1367-2. L'assaig consisteix en la realització de cicles d'immersió en una solució saturada de sulfat de sodi o bé de sulfat de magnesi, seguida d'un assecat en estufa de forma que la sal precipiti en els porus de la roca. Es prepara una fracció de mostra amb granulometria compresa entre 10 i 14 mm, que es sotmesa a cinc cicles d'immersió en una solució saturada de sulfat de magnesi, seguida d'assecat en estufa a 105°C. Amb aquest procediment, la mostra es sotmet a

processos tensionals repetits de cristal·litzacions i rehidratacions del sulfat de magnesi en la porositat i buits de la mostra. La disgregació produïda per aquests esforços es mesura per la quantitat de materials amb granulometria inferior a 10 mm produïda.

### 2.3 MÈTODES QUANTITATIUS DE CARACTERITZACIÓ DE LA DURABILITAT

Per tractar de solucionar les limitacions ja comentades de l'SDT, han aparegut alguns mètodes de descripció visual. Així la ASTM (American Society for Testing Materials) proposa una classificació dels materials assajats, segons si no han sofert canvis respecte a l'estat inicial de la mostra (tipus 1), si la grandària dels fragments resultants és una mescla entre petita i gran (tipus 2) o si els fragments resultants són només de mida petita (tipus 3).

No obstant això hi ha estudis que van un pas més enllà i proposen mètodes quantitius per a caracteritzar la fracció retinguda al tambor de l'SDT.

#### **2.3.1 Erguler, Z. A. & Shakoor, A. (2009) i el Desintegration Ratio**

Un mètode per a la caracterització quantitativa d'aquest material retingut és el Desintegration Ratio proposat per Erguler, Z.A. & Shakoor, A. (2009). Es basa en afegir a la classificació proposada per la ASTM, la realització de granulometries per tamisat després de cadascun dels cicles d'assaig. Així obté una relació entre l'àrea sota la corba del retingut acumulat i l'àrea total, per descriure els materials d'una manera quantitativa. Aquest percentatge s'anomena Desintegration Ratio (DR) i presenta un avantatge respecte al mètode no quantitatiu estàndard de l'SDT. Una mostra assajada a l'SDT i que dona uns resultats de durabilitat alts, es pot trencar en fragments petits (però més grans que l'obertura de la malla del tambor de 2,0mm) i pot sofrir slaking (engrunament), depositant-se aquest material al peu del talús. Però això no li passarà a una mostra amb DR alt, ja que aquest fet implicarà a més d'una durabilitat elevada que la mostra no es trencarà mai en trossos petits.

#### **2.3.2 Martínez-Bofill, J. (2011) i l'índex SDT corregit**

Aquest complet estudi sobre la caracterització de la durabilitat de les roques argiloses alterables, proposa un mètode quantitatiu basat en la correcció granulomètrica amb el sedàs UNE 12,5mm del material que queda retingut al tambor



després de l'assaig SDT. Aquest model de correcció ha estat l'utilitzat al present treball amb la inclusió dels sedassos UNE 2,0mm, 10,0mm i 20,0mm.

A més discuteix sobre l'altre problema de l'assaig que és el nombre de cicles, arribant a la conclusió que el nombre correcte per a caracteritzar correctament la durabilitat de les roques argiloses alterables és 4 o més. A la present tesina s'han escollit llavors 5 cicles d'SDT per a cada mostra.

Un altre punt tractat que incumbeix a aquesta tesina, és la realització d'un assaig d'envelliment mitjançant cicles de gel-desgel per simular les condicions que troben els materials al camp. El nombre de cicles considerat (15), s'obté amb el mètode proposat per Lienhart (1988) mitjançant l'elaboració d'un mapa de severitat dels cicles de gel-desgel. Per tant al present estudi també s'han considerat 15 cicles de gel-desgel, al tractar-se de la mateixa zona.

Per últim, Martínez-Bofill, J. (2011) proposa una classificació del grau de degradabilitat dels talussos que servirà per a validar els índex obtinguts en els assaigs de laboratori, i així proposar la millora de l'assaig SDT per a predir el comportament dels materials a mitjà i llarg termini. La taula 2-2 reproduceix els descriptors utilitzats al present treball.

**Taula 2-2.** Proposta de classificació de talussos en funció de la degradació a mitjà termini de la superfície excavada. Martínez-Bofill (2011).

Descriptors	Preservació de trepants de perforació	Aspecte superficial	Aixaraga_ llament	Aparició de trencaments	Durabilitat dels blocs caiguts	Resistència compressió simple UCS (indicatiu)	Litologia típica	Angle Talús natural (estimació preliminar)	Altres
Tipus talús									
I	Completa	Aflora roca sana en tota la cara del talús. Forma crestes i arestes anguloses	Nul	Talús estable. Alguna caiguda esporàdica de blocs (*)	Els blocs caiguts es mantenen pràcticament intactes.	> 100 MPa	Arenisca, calcàries	Abrupte > 60°	(*)
II	Trepants preservats amb esquerdament	Roca sana a lleugerament meteoritzada. Les arestes han estat arrodonides amb el pas del temps	Nul	Blocs aïllats o en petits volums. Fractures lístriques esporàdiques	Els blocs caiguts s'alteren lentament (>2-3 anys)	50-100 MPa	Calcària, calcària argilènca, limolita cimentada	> 40°	Diaclasses amb indicis d'oxidació
III	Desaparició progressiva	Roca meteoritzada en superfície. Esquerdament superficial intens. Aparició d'esquerdes de tracció que delimiten lloses. Disjunció nodular	Xaragalls incipients	Lliscaments per fractures lístriques. Freqüents caigudes de blocs	Blocs caiguts s'engrunen en 1-2 anys. Fragments centimètrics	25-50 MPa	Wackes i limolites carbonatades. Arenisques i limolites continentals	35° - 40°	-
IV	No es preserven	La roca està coberta per una capa de regòlit. Esquerdament superficial massiu i aspecte terrós de la superfície. Esquerdes defineixen fragments de 5-10 cm	Xaragalls incipients	Lliscaments per fractures lístriques i superficials. Caigudes massives de blocs	Els blocs caiguts s'engrunen en menys d'1 any	5-25 MPa	Calcàries argilènques marines, limolites carbonatades, limolites i lutites cimentades	30° - 35°	textura "pop-corn" en argiles expansives
V	No es preserven	Terrós. Textura "pop-corn". No aflora roca. L'espessor de regòlit pot ser superior a 0,5 m	Immediat. Molt intens	Lliscaments rotacionals profunds	No es produeixen blocs	< 5 MPa	Argiles-argilites	< 30°	Dipòsits argilencs poc consolidats

### **3 ÀREA D'ESTUDI**

#### **3.1 SITUACIÓ GEOGRÀFICA**

L'àrea geogràfica en que s'emmarca aquesta tesina, s'inclou dins de la Depressió Central Catalana. Aquesta és una gran conca o depressió de morfologia triangular, i relleus poc acusats que queda delimitada pel Massís dels Pirineus al Nord, per la Serralada Prelitoral Catalana a l'Est, i pel Massís Ibèric al Sud. De manera més concreta, la zona es restringeix a l'extrem nord-oriental de la conca, abastant part de les comarques d'Osona i el Bages. La topografia de la zona és poc acusada, amb relleus tabulars, petits turons i una xarxa hidrogràfica ben encaixada, formada per una multitud de rieres i barrancs. Aquest sector de la conca es drenat pels rius Llobregat, el Gurri i també pel riu Ter en la part nord d'Osona. Aquestes zones són principalment rurals, però geogràficament s'emplacen entre tres àrees de gran importància socio-econòmica per a Catalunya, com són els Pirineus i la costa catalana com zones de gran interès turístic i vacacional, i Barcelona com a capital. Per aquest motiu, hi ha un nombre important d'infraestructures viàries travessant aquestes comarques. Les principals carreteres que travessen la depressió central catalana en aquesta zona són el denominat Eix Transversal o C-25 que creua la Depressió en direcció E-W, i en direcció N-S, tenim dues carreteres principals, la C-16 que uneix les poblacions de Berga, Manresa i Martorell i la carretera C-17 que connecta Ripoll, Vic, Granollers i Barcelona.

#### **3.2 CLIMATOLOGIA**

La situació latitudinal del Principat, a cavall entre les zones climàtiques temperada i tropical, la posició entre dos mars i dos continents i l'enorme varietat geogràfica del territori, fan de Catalunya un país amb un singular mosaic de climes i amb una gran complexitat meteorològica. Poques àrees amb l'extensió de Catalunya reuneixen la seva diversitat climàtica (SMC, 2013).

Donada la seva situació latitudinal i a occident del continent euroasiàtic, el clima de Catalunya té uns trets pròpiament mediterranis, però participa d'altres més extrems, propis de les zones climàtiques entre les quals s'emmarca. És una àrea de

contacte de masses d'aire de característiques diferents: les fredes o polars, procedents de les latituds mitjanes i altes, i les càlides o tropicals, pròpies de latituds subtropicals i tropicals. La primera és sentida fonamentalment durant els mesos freds de l'any, mentre que la segona, caracteritzada per un anticicló en les capes mitjanes i altes de la troposfera, és predominant durant l'estiu. Per aquesta raó, el trimestre estival serà sec i la resta de l'any, moderadament humit.

D'altra banda, la posició de Catalunya, a l'occident europeu i a llevant de la Península Ibèrica, confereix al seu caràcter general mediterrani alguns trets atípics: l'hivern no és a Catalunya una estació plujosa, a causa de la seva posició a sotavent dels temporals atlàntics. L'oceà Atlàntic queda a ponent, però clarament separat del territori català per les elevades terres ibèriques. Aquestes poden exercir de barrera aerològica, atenuant i modificant la influència atlàntica. Al litoral i al prelitoral serà la tardor l'estació més plujosa, en donar-se els màxims contrastos tèrmics entre les aigües mediterrànies i les primeres colades fredes. Finalment, el clima queda matisat per la proximitat del continent africà, on té el seu origen algun dels tipus de temps que l'afecten. El resultat d'aquest joc d'influències es manifesta amb una pluviometria mitjana anual molt diversa.

La varietat geogràfica de Catalunya és realment extraordinària, sobretot si es té en compte la seva modesta extensió. La gamma d'altituds cobreix més de 3.000 metres, produint uns pisos climàtics, en especial tèrmics, que donen temperatures mitjanes anuals des de 17 °C a 0 °C. L'orografia es troba molt compartimentada en serres i depressions. Aquest factor, unit a diferents orientacions en les seves unitats de relleu, produeix grans contrastos climàtics i meteorològics entre unes comarques i les seves veïnes.

La disposició paral·lela a la costa de les serres Litoral i Prelitoral allunya les terres interiors de la influència marítima, més del què la modesta distància en línia recta faria suposar. Així es donen clars trets de continentalitat a la depressió Central catalana en oposició a la influència suavitzadora de les aigües mediterrànies a la costa.

Els esmentats factors geogràfics i la situació i posició de Catalunya produeixen com a resultat un autèntic mosaic de climes. Així, des del punt de vista

termopluiomètric, es poden definir un seguit de zones climàtiques aproximades, totes elles amb uns límits molt tènues (figura 3-1).

En definitiva, a excepció de la Vall d'Aran, de clima atlàntic, Catalunya de forma general es caracteritzarà, a grans trets, per uns hiverns amb temperatures suaus i estius calorosos i secs. La pluviometria és molt irregular. La presència de la massa d'aire mediterrània modera les temperatures alhora que pot originar pluges torrencials a la tardor, especialment a la zona litoral i prelitoral. A mida que s'avança cap a l'interior les característiques tèrmiques i pluviomètriques es modifiquen, generalment augmentant l'amplitud tèrmica i disminuint les precipitacions. Així, a la depressió Central els hiverns són freds i abunden les boires d'inversió tèrmica, mentre que els estius són molt calorosos i secs. A les zones de muntanya les temperatures són més baixes i les precipitacions més abundants. Al Pirineu Oriental l'estació més plujosa és l'estiu, degut al gran nombre de tempestes estivals. Per una altra banda, la posició de Catalunya entre Euràsia i Àfrica i a la frontera entre les masses d'aire tropical i polar, fa que es vegi afectada per entrades d'aire fred procedents del nord o d'aire calent procedents del sud, ocasionant sobtades baixades o pujades de temperatures.



**Figura 3-1.** Divisió climàtica de Catalunya, i situació de la zona d'estudi al cercle vermell. SMC (2013).

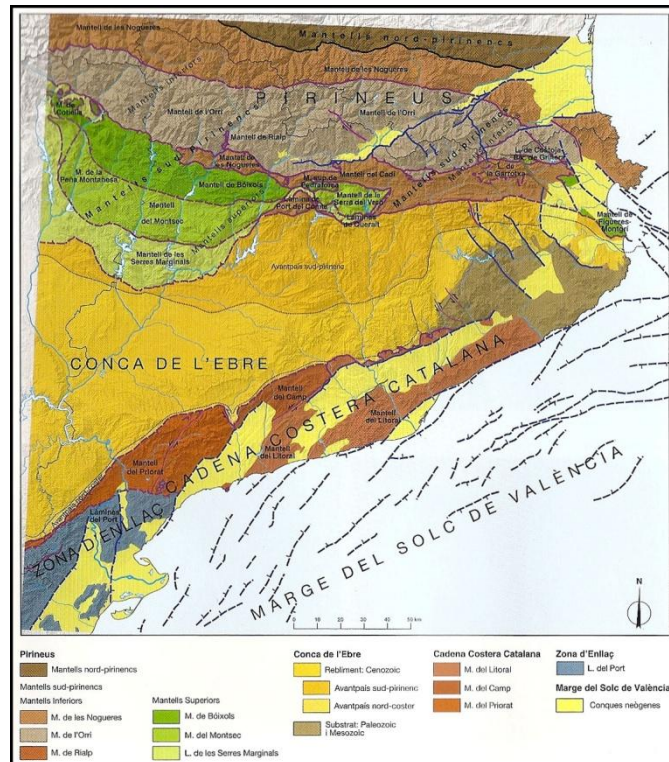
Pel que fa al clima de les dues comarques on es situa la nostra zona d'estudi, el clima d'Osona és Mediterrani Continental Humit, tot i que als relleus del nord (àrea prepirinenca) i de l'est (Montseny, Guàrdies i Collsacabra) la precipitació és abundant o molt abundant i la temperatura és més baixa. La precipitació cau de manera regular durant tot l'any, però l'hivern és l'estació més seca. Pel que fa a la temperatura, l'estiu és calorós a la Plana de Vic i més fresc a la resta. L'hivern és fred a tota la comarca, amb inversió tèrmica i boires que afecten sovint la plana. L'amplitud tèrmica és alta al centre i oest de la comarca i només l'estiu queda lliure de la possibilitat de glaçades.

La comarca del Bages té clima Mediterrani Continental Subhumit, amb precipitació mitjana anual al voltant dels 600 mm i una temperatura mitjana de 12°C a 14°C. En zones elevades, com són el Moianès, el massís de Montserrat o la serra de l'Obac, la pluviositat augmenta i la temperatura és lleugerament més baixa. El règim pluviomètric mostra un mínim hivernal i màxims a la primavera i a la tardor. Pel que fa a la temperatura, els hiverns són freds a tota la comarca i els estius calorosos, especialment a les zones més baixes. L'amplitud tèrmica anual és alta, de fins a 20°C, i el període lliure de glaçades va de juny a octubre.

### 3.3 GEOLOGIA

#### **3.3.1 Estructura geològica general**

La Depressió Central Catalana, s'inclou dins de l'àmbit geològic del que es denomina com la Depressió Terciària de l'Ebre, constituint el sector més oriental d'aquesta conca. Aquesta denominació tradicionalment correspon a l'espai relativament pla i cobert de terrenys terciaris poc deformats, compresos entre la Serralada Costera Catalana i els Pirineus. La Depressió Terciària de l'Ebre, respecte a la Serralada dels Pirineus, es troba en la posició d'una conca de avantpaís (figura 3-2).



**Figura 3-2.** Mapa geològic estructural de Catalunya i situació de la zona d'estudi. HNPC (1992).

Aquest tipus de depressió és típica en els erògens de col·lisió i s'associa a la formació de serralades. Aquest factor junt amb altres de tipus paleogeogràfic, paleoclimàtic o eustàtics (variacions del nivell del mar) han conformat l'estructuració del dispositiu estratigràfic de la conca. Aquesta Depressió es troba farcida per materials de edat Terciària. El Terciari continental de la Conca de l'Ebre presenta una part catalana composta especialment per l'Oligocè, amb un paquet sedimentari de l'Eocè superior continental. El farcit de la conca d'avantpauis dels Pirineus es va realitzar a partir dels primers moviments orogènics que es van registrar a finals del Cretaci superior i va durar de forma continua fins a mitjan Miocè. Aquest període de farcit coincideix, amb tot el temps de compressió pirenaica, i es pot dividir en dues etapes ben diferenciades. La primera (paleocena-eocena) està dominada per les transgressions marines: una en el Eocè inferior (Ilerdià) i una altra en el Eocè superior (Biarritzà-Priabonià). La segona etapa es caracteritza per la condició netament continental endorreica dels seus ambients sedimentaris i comprèn la part més alta del registre Eocè, tot l'Oligocè i gran part del Miocè (HNPC, 1992).

### 3.3.2 Estratigrafia

Els materials objecte d'estudi formen una potent sèrie sedimentària, relacionada de manera molt directa amb l'aixecament dels Pirineus al llarg de l'orogènesi alpina.

El conjunt de successions estratigràfiques es pot dividir en tres grans cicles o conjunts sedimentaris, relacionats amb esdeveniments estructurals que canviaren el règim de deposició de la conca.

A continuació es dona una descripció general de les grans unitats geològiques que constitueixen la Conca de l'Ebre a la zona d'estudi, de més antic a més recent.

#### 3.3.2.1 Cicle Ilerdià-Lutecià Inferior:

És el primer cicle deposicional a l'avantpaís meridional i als Pirineus. Està format per fàcies terrígenes, carbonàtiques i evaporítiques. En la Conca de l'Ebre aquest cicle es caracteritza per un règim de sedimentació fluvial, lacustre i marina soma. La unitat evaporítica de Beuda marca el límit superior d'aquest primer cicle.

##### 3.3.2.1.1 *Els dipòsits preilerdians:*

Correspon a la formació Mediona, i són els primers dipòsits sedimentaris de la conca de l'Ebre. Es daten al Paleocé, i tenen un clar origen continental. Estan formats per successions de lutites de color roig viu, amb intercalacions de gresos, i també algunes barres de conglomerat i calcàries lacustres degudes a la concreció de nivells de calitx. La potència d'aquesta sèrie és d'uns 50 m, té una morfologia lenticular que ocasiona que aflori de manera discontinua.

##### 3.3.2.1.2 *Els dipòsits ilerdians:*

La base de l'Ilerdià es caracteritza per la implantació d'un sistema deposicional al·luvial, que donà lloc a dipòsits de gresos, conglomerats i lutites, que constitueixen la formació Vilanova de Sau.

Posteriorment, durant l'ilerdià es va produir a tota la conca de l'Ebre i la regió pirinenca una transgressió marina, que resultarà en un canvi en les condicions de sedimentació, que s'inclou dins de la seqüència del Cadí. Es van produir grans dipòsits de plataforma carbonàtica que afloren a diferents sectors de la Cadena Costanera



Catalana, sota el nom de formació Orpí. A Igualada aquests materials assoleixen un gruix d'un centenar de metres

#### *3.3.2.1.3 Els dipòsits del Cuisià:*

Durant el Cuisià es va produir una regressió marina generalitzada, que resulta en la seqüència sedimentària de Corones.

En aquesta etapa. A les zones meridionals de la conca de l'Ebre, es va formar un sistema al·luvial on es varen tenir lloc dipòsits de granulometria grollera que es coneixen com a formació Conglomerats de Romagats.

En el sector de Sant Llorenç del Munt i probablement de Montserrat, a banda dels dipòsits bretxoides de còdols del Paleozoic, també es van dipositar conglomerats, gresos i lutites de color rogenc.

#### *3.3.2.1.4 El Lutecià inferior:*

En aquet període va tenir lloc una nova transgressió marina, que es restringeix a la zona més septentrional de la conca de l'Ebre, que va donar lloc a la seqüència d'Armàncies, la seqüència de Campdevàrol i la seqüència de Beuda. En el marge oriental de la conca, va continuar el règim de sedimentació continental, completant la deposició dels conglomerats de la part alta de la formació Romagats. En el sector de Sant Llorenç del Munt i de Montserrat es van continuar dipositant una successió de conglomerats, gresos i lutites de color rogenc.

#### *3.3.2.2 El Cicle Lutecià superior-Priabonià inferior:*

Correspon al segon cicle deposicional cenozoic, i inclou una gran varietat de fàcies terrígenes i carbonàtiques que es van formar durant el Lutecià superior i el Lutecià inferior, durant un període de temps d'uns 9 a 10 milions d'anys.

Els dipòsits s'acumularen en medis deposicionals al·luvials, transicionals i marins de plataforma. El conjunt es caracteritza per l'acumulació de successions gruixudes, predominantment terrígenes. El cicle sedimentari es tanca amb la sedimentació de la unitat evaporítica de Cardona.

Es distingeixen les següents etapes de sedimentació:

#### *3.3.2.2.1 El Lutecià superior:*

En el Pirineu va tenir lloc la deposició d'una sèrie gruixuda de plataforma terrígena i de ventalls al·luvials, que va resultar en les formacions de Coubet, Barcons, margues de Banyoles i Bellmunt, que s'engloben dins de la seqüència Bellmunt.

Cap al sud, aquests dipòsits progradants passen a una plataforma marina carbonàtica, que al seu torn passa a medis transicionals i al·luvials més cap al sud, que donen lloc a les formacions del grup Pontils.

En el sector de Montserrat va continuar el règim de sedimentació al·luvial descrit a l'etapa cuisiana i luteciana.

#### *3.3.2.2.2 El Bartonian i el Priabonian inferior:*

Durant el Bartonian tingué lloc una noca etapa d'expansió marina que afectà la zona d'avantpaís més pròxima als Pirineus (Garrotxa, i la conca de Vic), i el marge de la Cadena Costanera Catalana, fins a la conca d'Igualada.

En aquest règim de sedimentació es varen depositar successions potents de gresos de ventalls litorals i plataformes terrígenes amb barres arenoses submarines, riques en glauconita en la formació gresos de Folgueroles, i part de la formació gresos de Centelles. A Igualada, aquesta formació de Gresos i Lutites de la Portella té característiques pròpies d'un medi lacustre.

Un cop acabada l'etapa transgressiva inicial del Bartonian, s'inicia una successió complexa de retrogradació progradació dels sistemes deltaics i dels ventalls litorals apareguts a conseqüència de la transgressió. En els sectors septentrionals, les aportacions terrígens provenen dels Pirineus, mentre que a la conca de Vic, els dipòsits terrígens de Centelles provenen de la Cadena Costanera Catalana. Corresponen a dipòsits de front i de plana deltaica, que afloren de manera extensa des de la conca de Vic fins als primers relleus dels Pirineus. Més al sud, els sistemes de ventalls al·luvials de Montserrat evolucionaren durant aquest període formant successions de conglomerats, gresos i lutites que es segueixen des de Calders fins a la conca d'Igualada.

En els sectors més centrals de la conca de l'Ebre, aquests dipòsits terrígens marginals evolucionen per donar lloc a successions potents de lutites gris blavoses que donen lloc al característic paisatge de la formació Margues de Vic i la formació Margues d'Igualada.

Localment, aquestes pulsacions de progradació-retrogradació litoral dona lloc a la formació de complexos escullosos, com la formació Calcàries de la Tossa o la formació Sant Bartomeu del Grau.

La fi de la sedimentació marina en el sector oriental de la conca de l'Ebre es caracteritza per la formació d'una gran varietat de fàcies preevaporítiques restringides (esculls d'ostreïds i algues roges, margues anòxiques de talús i nivells d'oòlits i estromatòlits). Aquest nivells s'observen des de la zona d'Igualada fins a Vic són anteriors al desenvolupament de la successió evaporítica de la formació Guixos d'Òdena i la formació Salina de Cardona.

#### 3.3.2.3 *Cicle del Priabonià superior - Oligocè terminal:*

Correspon a l'últim cicle deposicional cenozoic del marge oriental de la Conca de l'Ebre. A partir del Priabonià superior, aquesta part oriental fou una conca no marina i possiblement endorreica, fet que va influir en l'evolució dels sistemes al·luvials i lacustres que s'hi desenvolupaven. A les àrees pròximes als Pirineus, la Cadena Costanera Catalana i la Zona d'Enllaç hi havia formacions carbonàtiques i evaporítiques mesozoiques i paleògenes inferiors gruixudes, l'erosió mecànica i la dissolució dels quals aporta clastos i soluts a les àrees de sedimentació.

El conjunt del cicle sedimentari es caracteritza per l'acumulació de successions terrígenes, carbonàtiques i evaporítiques potents, durant un període d'uns 10 a 12 milions d'anys. Els dipòsits terrígens es dipositaren en grans sistemes al·luvials, i la resta en sistemes lacustres d'extensions i característiques variables.

Els mantells de corriments dels Pirineus van delimitar en aquest moment el marge nord de la Conca de l'Ebre, produint-se la configuració d'uns grans dispositius al·luvials. En aquest sistema, el gruix de sediments i la mida dels clastos de les successions al·luvials va disminuint a mesura que ens acostem al centre de la conca. L'anàlisi de les successions estratigràfiques dona lloc a la divisió de cinc etapes

evolutives. Al principi de cada etapa s'implanta un sistema lacustre que acaba amb la progradació de sistemes al·luvials marginals. Cada etapa inclou els dipòsits d'un sistema lacustre i els dipòsits al·luvials que es troben entre la seva base i la base del següent sistema lacustre suprajacent.

#### *3.3.2.3.1 El Priabonià superior:*

L'etapa del Priabonià superior inclou els dipòsits evaporítics i carbonàtics del sistema lacustre de la Noguera, i un conjunt d'unitats terrígenes de procedència pirinenca com són la formació de Conglomerats de Berga, la part inferior de la formació Gresos de Solsona, i la formació de Súria. També trobem unitats terrígenes de procedència ibèrica, com és la formació Artés.

#### *3.3.2.3.2 L'Oligocè:*

En l'Oligocè inferior s'inclouen les unitats evaporítics, carbonàtiques i terrígenes dels sistemes lacustres de l'Anoia, la Segarra i l'Urgell. També s'inclouen les unitats al·luvials de la formació Solsona, la part superior de la formació Conglomerats de Berga, els materials de la formació Artés i el grup d'Scala Dei. La part superior d'aquest període està formada per les successions lacustres dels Monegres, que ja escapen de la zona d'estudi d'aquesta tesina.

### **3.3.3 Estructura geològica de la zona d'estudi**

L'àrea d'estudi es troba situada a la depressió central catalana i dintre d'aquesta, a la conca de Vic.

En aquest sector la successió paleògena està formada per un conjunt inferior de materials detrítics vermells, d'origen continental, que localment tenen intercalacions de nivells de calcàries marines d'escassa potència, a sobre de les quals es troba una successió potent de materials marins de l'Eocè mitjà (seqüències de Bellmunt i Milany). A sostre trobem un tercer conjunt de materials d'origen continental que formen els termes més alts del registre de la Conca de l'Ebre en aquest sector. El conjunt continental i marí inferior correspon als dos primers cicles sedimentaris (Paleocè-Priabonià inferior) definits en la regió. El conjunt continental superior corresponent a materials del tercer cicle dipositats després de la regressió del Priabonià, a partir de la

qual, la Conca de l'Ebre va passar a actuar com una conca de drenatge interna (IGME, 1975 y IGME, 1983).

#### 3.3.3.1 Conjunt continental i marí inferior:

Es un conjunt litoestratigràfic que abasta des del Paleocè superior al Lutecià inferior. Equival a les seqüències deposicionals de Cadí, Corones, Armàncies, Campdevàrol i Beuda. Té un espessor màxim de 550 m en la zona de Romagats-Vilanova de Sau. Dins de les fàcies detrítiques vermelles es distingeixen tres trams. La inferior, es data del Tanetià, i té fins a 40 m d'espessor que correspon a la formació de Mediona, que està formada predominant per lutites vermelles que intercalen nivells de conglomerats sorrencs i d'arenisques. Es troben també nivells carbonàtics d'origen edàfic i en ocasions palustre. A sobre trobem la formació de Vilanova de Sau, constituïda per una successió de nivells lutítics i sorrencs amb intercalacions de conglomerats, que predominen cap a la part superior. Damunt també es troba la formació de Romagats, predominantment conglomeràtica, amb cantells de fins a 2 m de diàmetre, i petites intercalacions de nivells d'arenisques i lutites. En el sector NE, s'intercala una falca de materials marins que no entra dins de l'àmbit d'estudi.

#### 3.3.3.2 Conjunt de materials d'origen marí:

Aquest conjunt litoestratigràfic correspon al segon cicle Lutecià superior-Priabonià inferior, on també es troben les seqüències deposicionals de Bellmunt, Milany i Cardona. La seqüència de Milany comença en la seua base amb la deposició de la unitat Areniscas de Folgueroles, que té una potència de fins a 100 m. Lateralment aquestes arenisques passen a ser calcàries i margues, que es defineixen com formació de Collbàs. A sobre es troba una acumulació de fins a 500 m de materials margosos denominats Margues de Vic, dipositades mitjançant una sèrie de mecanismes deltaics. Aquestes margues equivalen a les Margues d'Igualada del Grup Santa Maria. En la zona de Vic aquesta sèrie margosa es divideix en quatre membres diferenciats: membre de Manlleu, membre de Gurb, membre de la Guixa i membre de Vespella. En els sectors més pròxims a la línia de costa, es van dipositar arenisques i conglomerats (Arenisques de Centelles, Arenisques de Milany, Conglomerats de Santa Magdalena). En les zones intermèdies es troben seqüències estratocreixents i granocreixents des de margues en

la base fins a arenisques i conglomerats a sostre, lligades a progradacions deltaïques. Aquestes seqüències presenten nivells de calcàries coral·lígenes que corresponen a esculls, i que es van desenvolupar des de finals del Bartonià fins al Priabonià inferior (Calcàries de Collsuspina, i Calcàries de Sant Bartomeu del Grau, que equivalen a la formació de Tossa de l'àrea d'Igualada). A partir del Priabonià inferior, a sobre de les Margues de Vic, ens trobem en el marge de la seqüència evaporítica de la conca potàssica catalana, representada per la formació Guixos de la Noguera i el seu equivalent en Igualada denominat Guixos d'Òdena (figura 3-3).



**Figura 3-3.** Contacte entre els guixos de la formació de la Noguera, i les margues blaves del membre Vespella de la formació Margues de Vic. Talús situat a prop de la localitat de Gurb.

#### **3.3.3.3 Conjunt superior de materials continentals:**

Correspon a materials del tercer cicle sedimentari, denominat formació d'Artés, que es troba per sobre dels guixos de la unitat evaporítica de Cardona. Està formada per una alternança de lutites i arenisques de color vermellós d'origen al·luvial que afloren extensament (figura 3-4).



**Figura 3-4.** Formació de sostres al degradar-se els estrats més tous de material vermellós de la formació d'Artés. Talús a la C-25.

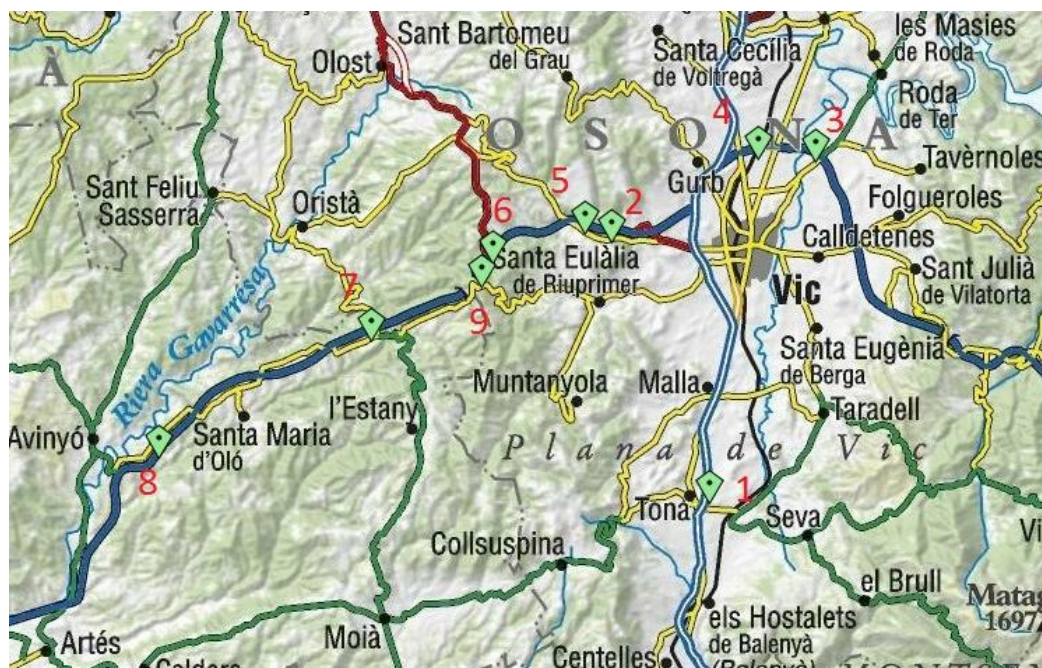
### 3.4 SITUACIÓ DELS TALUSSOS ESTUDIATS

Un cop vistes tant la situació geogràfica, la climatologia i la geologia de la zona d'estudi, s'enumeraran a continuació els talussos estudiats a la tesina, els materials dels quals han estat assajats, com s'explicarà als següents apartats.

És important remarcar que la zona d'estudi seleccionada compleix tres requisits fonamentals, amb tal de poder caracteritzar correctament els talussos:

- ➔ L'existència de carreteres amb talussos oberts recentment, per a conèixer l'evolució temporal del desmunt.
- ➔ Les carreteres deuen presentar facilitats d'accés, tant a peu com per a vehicles, i que siguin carreteres importants des del punt de vista de xarxa viària.
- ➔ Les carreteres deuen creuar materials sedimentaris que es troben constituïts total o parcialment per roques toves.

Primerament es mostrarà la zona estudiada al mapa topogràfic de Catalunya 1:500.000 (ICC, 2002) (figura 3-5) on es troben situats els talussos i després es presentaran les seves coordenades al fus ED50 (figura 3-6).



**Figura 3-5.** Mapa topogràfic de Catalunya 1:500.000, amb els talussos situats amb marcadors verds. ICC (2002).

**Taula 3-1.** Dades dels talussos estudiats

Número del talús	Nom del talús	Latitud	Longitud	Via i P.K.
1	Tona 1	4633653	436751	C-17 km 50
2	Gurb 1	4642888	433243	C-25 km 175
3	Vic 2	4645750	440550	C-25 km 182
4	Vic 3	4645846	438530	C-25 km 181
5	Gurb 2	4643212	432286	C-25 km 173
6	Olost 1	4642149	429012	C-25 km 170
7	Oristà 1	4639409	424661	C-25 km 164
8	Avinyó 1	4635253	417044	C-25 km 156
9	Fontfreda 1	4641295	428588	C-25 km 168

Seguidament es situaran els talussos sobre el mapa geològic de Catalunya 1:250.000 (figura 3-6) i 1:50.000 (ICC, 2002) (figura 3-9), i es descriuran els principals materials que formen cadascun dels talussos amb ajuda de les corresponents llegendes dels mapes citats (figura 3-7, 3-8 i 3-10).





Figura 3-6. Mapa geològic de Catalunya 1:500.000, amb els talussos situats. ICC (2002).

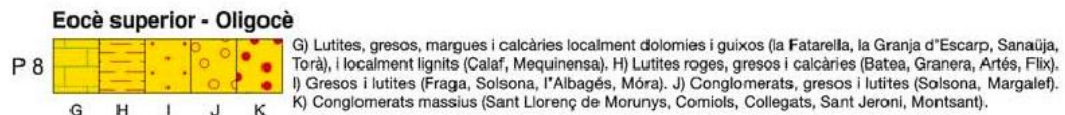


Figura 3-7. Llegenda del mapa geològic de Catalunya 1:500.000. Els talussos Olost 1, Oristà 1, Avinyó 1 i Fontfreda 1, es classificaran com a materials G a la llegenda. ICC (2002).

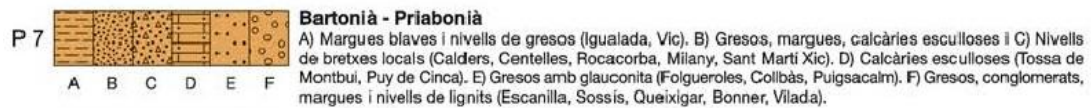


Figura 3-8. Llegenda del mapa geològic de Catalunya 1:500.000. Els talussos Tona 1, Gurb 1, Vic 2, Vic 3 i Gurb 2, es classificaran com a materials A a la llegenda. ICC (2002).

Per obtenir més grau de detall s'ha inclòs també el següent mapa:

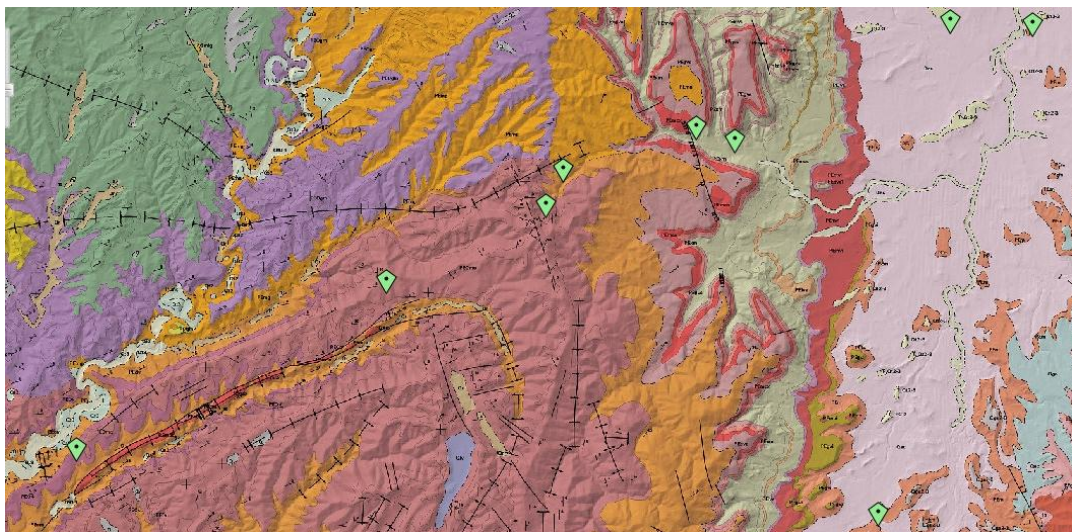


Figura 3-9. Mapa geològic de Catalunya 1:50.000, amb els talussos situats. ICC (2002).

<b>Qac</b>	Dipòsits al·luvials-col·luvials. Graves amb matriu sorrenca i argilosa. Holocè.
<b>PEmvs</b>	Margues blaves amb fòssils. Primer cicle de la Formació Vidrà Superior i les formacions Margues de Gurb, Margues de la Guixa i Margues de Vespella. Bartonianà mitjà-superior.
<b>PEcm</b>	Calcàries i margues amb restes de gasteròpodes. Priabonià.
<b>PEOmc</b>	Margues, calcàries grises i lutites. Inclou part de les formacions Calcàries de Tàrraga, Calcàries de Montmaneu, Calcàries de la Panadella i Calcàries de Santa Coloma. Priabonià-Oligocè inferior.
<b>PEOx</b>	Margues grises i gresos amb intercalacions de guixos. Eocè-Oligocè.

**Figura 3-10.** Unitats geològiques de la llegenda del mapa geològic de Catalunya 1:50.000, presents als talussos estudiats. ICC (2002).

Els talussos Tona 1, Vic 2 i Vic 3 estan formats principalment pels materials de la unitat geològica Qac, Gurb 1 i Gurb 2 per la unitat PEmvs, Olost 1 per la unitat PEcm, Fontfreda 1 i Oristà 1 per la unitat PEOmc i Avinyó per la unitat PEOx.

## **4 METODOLOGIA**

A l'àrea d'estudi s'han vist les condicions climàtiques i geològiques presents a la zona d'estudi. Aquests dos factors provoquen que els materials es degradin i donen problemes d'estabilitat de talussos. Per recrear les condicions al camp i analitzar el perquè d'aquesta degradació s'ha realitzat un treball de camp i uns assajos al laboratori, seguint un procés que es detallarà seguidament. Aquest procés es pot separar en dues grans parts, treball de camp i treball al laboratori.

### **4.1 TREBALL DE CAMP**

La primera tasca realitzada fou una reunió per tal de planificar el treball de camp i així optimitzar el temps durant les visites de camp realitzades. A partir d'aquí, s'han fet tres visites inicials on es s'han caracteritzat els talussos, s'han pres fotografies dels mateixos (aquesta informació es a les fitxes de camp incloses als annexes), i s'han recollit mostres de roca sana representatives dels materials existents. A la primera visita s'han visitat tres talussos, Tona 1, Gurb 1 i Vic 1, però degut a la mala qualitat de la mostra agafada al talús Vic 1, no ha estat possible preparar-la per a l'assaig SDT i per tant no s'ha inclòs aquest talús a l'estudi finalment. A la segona visita s'han visitat tres talussos més, Vic 2, Vic 3 i Gurb 2, mentre que a la última s'han estudiat quatre: Olost 1, Oristà 1, Avinyó 1 i Fontfreda 1.

#### **4.1.1 Descripció dels talussos i materials que els componen**

La caracterització de camp és la primera feina a fer en arribar a un talús nou, per a poder així identificar els diferents estrats, saber quantes mostres s'han d'agafar i quins són els millors punts d'extracció, per qualitat del material i per facilitat. Consisteix en realitzar primerament una descripció morfològica detallada dels talussos i els desmunts amb les característiques pròpies del talús, com la situació geogràfica, orientació i dimensions, la litologia i l'estratigrafia detallada, així com les possibles variacions que presenta. També es descriu el tipus de sistema d'excavació utilitzat i si encara s'observen les canyes de les voladures.

En segon lloc s'ha descrit la litologia dels talussos detallant els diferents materials aflorants. Més enllà d'identificar el tipus de roca, també s'ha valorat el seu estat d'alteració. D'aquesta manera queden representats:

- ➔ Color del material
- ➔ Descripció litològica de cada nivell
- ➔ Granulometria estimada dels nivells terrígens
- ➔ Potència i proporció de cada nivell dins del talús
- ➔ Angle d'inclinació de la cara del talús
- ➔ Espessor de material alterat
- ➔ Característiques particulars de cada nivell, com presència de fòssils, vetes de guix, porositat... que en alguns casos puguin tenir importància en l'estabilitat del conjunt.

Pel que fa a les inestabilitats observades són tres els fenòmens que s'han anat anotant:

- ➔ Blocs caiguts: presència i dimensions dels blocs caiguts, lloc de desprendiment, estat d'alteració dels blocs, freqüència de caiguda, treballs de recollida i manteniment, volum d'acumulació a peu del talús...
- ➔ Formació de sostres: presència de sostres i la seva profunditat, continuïtat lateral, nivells litològics afectats, caiguda de blocs per desplaçament, diaclasat regional, mesures de protecció...
- ➔ Alteració i engrunament del talús: desenvolupament d'esquerdes lístriques, engrunament progressiu, grau d'alteració, inestabilitats associades....

Finalment, també es descriuen les mesures de correcció adoptades fins al moment per millorar o garantir l'estabilitat de cada talús.

La descripció i valoració de l'estat de cada talús és molt important per que permetrà validar els resultats dels assajos del laboratori. Així doncs, s'haurà de fer un bon reconeixement "in situ" de les condicions geològiques-geotècniques dels materials estudiats.

#### **4.1.2 Obtenció de les mostres**

El següent pas, una vegada descrit un talús, és la recollida de les mostres corresponents per a assajar-les. Com ja s'ha comentat, s'ha extret una mostra per cadascuna de les diferents litologies del talús, i així veure si es presentaran possibles inestabilitats per la diferent degradació entre els estrats més tous i els més durs. L'obtenció de mostres de la millor qualitat i representativitat possible, ha sigut el principal condicionant del treball de camp realitzat en el present estudi.

Per a la presa de mostres, l'equip de camp utilitzat ha sigut l'habitual en geologia i enginyeria geològica (llibreta de camp, brúixola, martell de geòleg, mall, escarpa...). El ritme de treball normal ha permès caracteritzar entre tres i quatre talussos per jornada de camp, amb unes jornades d'unes 8 a 10 hores i dues persones.

La selecció dels talussos no ha depès exclusivament de criteris geològics, ha depès majorment de la voluntat de comparar el comportament de les mostres assajades pel que fa a l'obtingut per Martínez-Bofill, J. (2011). D'entre els talussos mostrejats en el seu estudi s'han seleccionat els que presentaven una major seguretat en l'obtenció de mostres. Els talussos estudiats es troben en carreteres i vies principals, d'alta velocitat i d'ús freqüent, tant per turismes com per vehicles pesats com camions articulats de gran tonatge, autocars... La metodologia d'estudi emprada obliga a estacionar un vehicle en el voral, senyalitzar adequadament la zona de treball i realitzar les labors de caracterització i presa de mostres en una franja molt estreta, entre la paret rocosa i la calçada on els turismes i vehicles pesats circulen a gran velocitat. Per això els talussos seleccionats es troben en punts on la visibilitat sigui bona, de fàcil accés i amb espai suficient per a estacionar el vehicle. Cal comentar a aquest efecte que s'han aprofitat les obres en la C-25 (l'Eix Transversal) per a prendre la major quantitat de mostres útils possible en els talussos d'aquesta via. Agrair novament a la promotora de les obres, Cedinsa, que ens facilitessin les tasques d'accés i aparcament prop dels talussos que es volien estudiar.

Uns altres condicionants que poden dificultar o impossibilitar l'obtenció de mostres són la presència d'elements com malles metàl·liques cobrint el talús, murs a mitja altura o tanques entre altres elements. Alguns talussos, encara recentment

excavats mostren símptomes de deterioració, com la formació de sostres, presència d'alguns blocs inestables, caigudes recurrents de blocs, en els que es deu ser especialment caut durant tot el procés de caracterització i presa de mostres.

Una vegada seleccionat un talús accessible, i amb el vehicle estacionat i senyalitzat, es procedeix a caracteritzar el talús i els seus diferents estrats. Una vegada fet això, es realitza el mostreig mitjançant el martell de geòleg i l'escarpa escollint prèviament la zona del talús en la qual serà més senzilla l'obtenció d'una mostra sana de roca. Abans de procedir a l'obtenció de la mostra s'ha de sanejar el front del talús, per eliminar el tram superficial de roca alterada i meteoritzada, fins a aconseguir la citada roca sana. L'espessor de regòlit serà variable, en funció de l'edat del talús, i del potencial de degradabilitat dels materials a mostrejar. L'ús de l'escarpa no és sempre necessari, ja que en els estrats més febles (per exemple a Avinyó 1 a tot el talús, Oristà 1, Olost 1 i Fontfreda 1, als estrats en principi més dèbils) amb el martell de geòleg es pot excavar fins a trobar roca sana. Un aspecte a tenir en compte és la grandària i la quantitat de les mostres obtingudes, ja que necessitarem una grandària suficientment gran perquè en preparar-les per als assajos no es trenquin en fragments més petits que el que marca la norma com a mínim. Amb respecte a la quantitat, s'ha planificat poder obtenir de cada mostra un mínim d'uns 25 fragments reglamentaris, d'entre els quals s'elegiran els 20 més regulars geomètricament i que no presentin trencaments. Com es veurà més endavant, la meitat serà sotmesa a l'assaig Slake Durability Test (SDT) i l'altra meitat a cicles d'envelliment gel-desgel previs a assajar-los també mitjançant el SDT.

#### 4.2 TREBALL AL LABORATORI

S'ha caracteritzat la durabilitat de les mostres obtingudes mitjançant l'assaig Slake Durability Test (SDT) o Assaig de Durabilitat a l'Engrunament. De cada mostra s'han realitzat dos assajos SDT diferents. En primer lloc s'ha realitzat un primer assaig de la mostra sense tractament previ i amb l'objectiu de simular els efectes produïts pel gel-desgel en els talussos, s'ha realitzat un segon assaig SDT amb mostres després de sotmetre-les a un procés d'envelliment de 15 cicles de congelació-descongelació.



#### **4.2.1 Preparació de les mostres**

D'acord amb la norma ASTM D4644 (1987) la quantitat de mostra necessària per dur a terme l'assaig SDT són 10 fragments de roca, de morfologia aproximadament esferoïdal o equidimensional amb una massa d'entre 40 i 60 g. En el nostre cas, a causa de la dificultat que representa tallar els fragments de roca en forma esferoïdal, s'ha decidit que tinguin forma cúbica, però sempre serrades en una dimensió suficient per complir el criteri de pes especificat anteriorment, es a dir, uns 30 mm de costat.

Primerament, totes les pedres han estat marcades (figura 4-1) i tallades en trossos allargats més o menys del gruix dels cubs objectiu, en el Servei de Làmina Prima de la Facultat de Geologia de la UB, mitjançant una serra de disc de diamant, refrigerada amb aigua.



**Figura 4-1.** Marcat de les llesques sobre les pedres extreïdes dels talussos, per a ser serrades al servei de làmina prima a la Facultat de Geologia de la UB.

Cal comentar que en un primer moment s'havia previst la possibilitat d'anar al camp i recollir més mostres, però el procés de tall de les roques ha estat lent i ha suposat que no es disposés de més temps per tornar a efectuar el mostreig i una nova ronda de tall. Degut a aquesta previsió d'una nova visita al camp i la conseqüent recollida de material, que al final no es pogué realitzar, alguns talussos s'han numerat amb un 1, encara que després no hi hagi el corresponent talús número 2.

Posteriorment aquestes làmines les he tallat en cubs amb una serra de menor grandària i per tant més manejable, refrigerada per aigua, tant per minimitzar el dany a la mostra com per evitar el sobreescalfament de la màquina. La serra pertany al

Laboratori de Sòls, Roques, Petrografia i Mineralogia de l'empresa Geomar Enginyeria del Terreny (figura 4-2).



**Figura 4-2.** Serrat de mostres a Geomar, per preparar els cubs a assajar.

Una vegada preparada, cada mostra s'asseca en una estufa a 110°C fins a massa constant. Les he deixat a dintre unes 24 hores per assegurar-me que ho aconsegueixin. Llavors es treuen i quan han agafat la temperatura de laboratori, es pesen, s'anoten els pesos i es fotografien. Ja estan preparades per a l'assaig SDT.

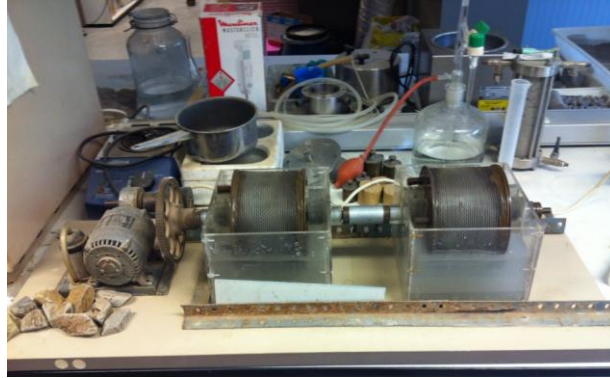
#### **4.2.2 Slake durability test**

En primer lloc es descriuran els elements de l'equip d'assaig (figura 4-3):

- Tambor d'assaig de forma cilíndrica, amb el cos lateral format per una malla normalitzada amb obertura de 2 mm, amb una longitud de 100 mm, diàmetre de 140 mm i una base sòlida fixa. L'altra base del cilindre també és sòlida, però ha de ser practicable per poder accedir a l'interior del tambor. El tambor ha de resistir temperatures de fins a 110°C sense deformar-se.
- Un recipient per contenir el tambor d'assaig, situat amb el seu eix horitzontal, de manera que li permeti girar lliurement i que pugui emplenar-se amb l'aigua per produir l'engrunament. S'ha utilitzat aigua destilada, fins a un nivell de 20 mm per sota de l'eix del tambor. El tambor estarà muntat de manera que existeixi una distància de 40 mm entre la base del recipient i la part més baixa de la malla cilíndrica. Per poder optimitzar el temps, el sistema usat disposa de 2 recipients disposats en sèrie, i 4 jocs de tambors, de manera que es poden realitzar 2 tandes consecutives de 2 assajos SDT simultanis.



- Un motor capaç de fer girar els tambors a una velocitat de  $20 \pm 1$  rpm, durant un període de deu minuts.
- Un forn capaç de mantenir una temperatura de  $100^\circ \pm 5^\circ\text{C}$ , durant un període mínim de 12 hores.
- Una balança capaç de pesar els tambors i la mostra, amb una precisió de 0,5 g.



**Figura 4-3.** Equip d'assaig SDT del laboratori del Departament d'Enginyeria del Terreny de la UPC.

#### 4.2.2.1 Procediment de l'assaig

- Es prepara una mostra representativa del material a assajar formada per 10 fragments. Cada fragment ha de pesar entre 40 i 60 g.
- La mostra preparada es col·loca dins dels tambors d'assaig, i s'assequen fins a aconseguir un pes constant, en un forn a  $105^\circ\text{C}$ . Normalment és suficient amb unes 6 hores. Es retiren els tambors amb els fragments del forn, es deixen refredar a temperatura de laboratori, i es registra el pes del conjunt mostra més tambor (A). Es procedeix immediatament a realitzar l'assaig.
- S'ajusta bé la tapa del tambor, i el conjunt es munta en els recipients i s'acobla el motor giratori. Els recipients s'emplenen d'aigua corrent a  $20^\circ\text{C}$ , fins a un nivell de 20 mm per sota de l'eix del tambor. Es fa girar els tambors a 20 rpm durant un període de 10 minuts.
- Passats els 10 minuts, es para el motor, es desacoblen els tambors i es retiren dels recipients. S'introdueix el conjunt tambor més mostra en l'estufa a  $105^\circ\text{C}$  fins a aconseguir una massa constant. Una vegada les mostres estan seques, es retiren del forn, es deixa refredar a temperatura de laboratori i s'anota el pes (B).
- Per a cada cicle d'assaig es repeteixen els passos dels apartats 3 i 4, registrant en cada cas el pes (C) del tambor més la porció de mostra retinguda.

- ➔ Finalment, es netegen els tambors i s'anota el seu pes (D).

#### 4.2.2.2 Obtenció de resultats

El valor de durabilitat  $Id(x)$  obtingut en cada cicle, correspon a la relació entre el pes final i el pes inicial de la mostra, expressada com tant per cent, segons l'equació 4-1:

$$Idx = \frac{C-D}{A-D} \times 100 \quad \text{Equació 4-1}$$

La ASTM D4644 (1987) recomana la realització de dos cicles de desgast ( $Id2$ ) i denomina el valor obtingut com a Índex Sehudes. En el nostre cas hem realitzat 5 cicles de durabilitat ( $Id5$ ) sobre cada mostra assajada amb la finalitat de validar el nombre de cicles necessaris per a aquest tipus d'estudi. S'han escollit 5 cicles d'assaig pels motius citats a l'apartat anteriors i així poder comparar els resultats amb l'estudi Martínez-Bofill, J. (2011).

#### 4.2.2.3 Expressió de resultats

Per a cada mostra assajada, es realitza un acta o informe de resultats, les quals es presenten als annexos i que inclouen la següent informació:

- ➔ Índex de durabilitat obtingut per a cada cicle d'assaig  $Idx$ .
- ➔ Naturalesa i temperatura del líquid utilitzat en la immersió de les mostres, es a dir, aigua destil·lada a 20°C aproximadament.
- ➔ Descripció de la mostra abans i després de l'assaig.
- ➔ Fotografia i aspecte dels fragments retinguts en el tambor.

#### 4.2.3 **Envelliment en cicles de gel-desgel**

S'han realitzat cicles d'envelliment en gel-desgel, per estudiar l'efecte de les condicions climàtiques sobre les mostres. Per a això s'ha utilitzat un frigorífic. Aquesta opció té la limitació que s'han de realitzar totes les fases manualment. Així, la fase de congelació comença al final del dia de treball, introduint les mostres dins del frigorífic. Les mostres es treuen del congelador al matí, a l'inici de la jornada per iniciar la fase de desgel. D'aquesta forma, tan sol es poden realitzar cinc cicles de congelació durant la setmana laboral.

#### 4.2.3.1 Equip requerit

- Per a la realització de cicles d'envelliment en gel-desgel, s'ha utilitzat un frigorífic, que treballa a una temperatura estable de  $-18^{\circ} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ .
- Estufa per assecar les mostres fins a massa constant, capaç de mantenir una temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Contenidors o cubetes per mantenir les mostres parcialment submergides en una solució d'alcohol isopropil al 0,5% en aigua destil·lada.
- Balança per determinar la massa de les mostres amb una precisió del 0,1% de la massa total.
- Solució d'aigua destil·lada amb una mescla al 0,5% d'alcohol isopropil.

#### 4.2.3.2 Procediment

Per a aquest assaig es requereix que les mostres tinguin les mateixes característiques que per a l'assaig de durabilitat SDT, ja que una vegada realitzats els cicles de congelació s'haurà de comprovar la variació de durabilitat SDT. Per això s'han preparat uns 25 cubs per a cadascuna de les mostres: 10 (intactes) per a assajar-les amb l'SDT, 10 (envellides) per a sotmetre-les a cicles d'envelliment gel-desgel i SDT i unes 5 de reserva per si es feien malbé. Així, per a cada mostra es necessiten deu fragments de 40 a 60 g de pes.

- Assecar les mostres en estufa fins a aconseguir massa constant ( $\pm 0,1\%$  de la massa total), a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , numerar cada fragment i anotar el seu pes. S'ha d'examinar cada fragment de mostra, anotant la presència de discontinuïtats, fractures, estratificacions o qualsevol pla de debilitat. Etiquetar-les correctament, i fotografiar-les amb una escala gràfica.
- Situar cada mostra en una cubeta, damunt d'un tros de baieta o teixit fibrós.
- Afegir una quantitat suficient de solució d'alcohol isopropil dins de la cubeta per cobrir les mostres
- Examinar les mostres i anotar els canvis que es produeixin i fotografiar-les si es considera necessari.
- Deixar reposar les mostres submergides durant un període de 24 hores, anotant els canvis que es produeixin.

- Una vegada passat aquest període, decantar el líquid fins que tan sol quedi submergit el teixit de la base, però sense que aquesta ho sobrepassi. D'aquesta forma la mostra es manté sempre humida, a causa de l'ascens capil·lar de la solució en el teixit, però sense tenir contacte directe amb ella.
- Col·locar les safates amb les mostres en el congelador frigorífic a  $-18^{\circ} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$  per un període de temps mínim de 12 hores (no hi ha límit superior d'emmagatzematge en la fase de congelació).
- Una vegada completa la fase de congelació, posar la cubeta i la mostra a una temperatura de laboratori ( $23^{\circ} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$  durant un període mínim de 8 hores).
- Repetir el cicle de gel-desgel durant un nombre de 15 cicles.
- Finalment descongelar definitivament les mostres i anotar els canvis que s'han produït. Descriure-les i fotografiar-les.
- Assecar les mostres i anotar el seu pes.
- Una vegada completat el procés d'envelliment, assajar la mostra en SDT.

Cal comentar per últim que s'ha intentat que al final del procés de gel-desgel, al retirar les mostres de damunt de la baieta, hi quedessin marcades les possibles fissures que es produïssin i així poder obtenir un índex de fissuració, per exemple longitud de fissures entre superfície de la base del cub. Això no ha estat possible degut a que la baieta s'ha quedat massa seca durant els cicles de gel-desgel i no s'han quedat marcades les fissures. Es recomana per a futurs estudis, afegir la solució d'alcohol isopropil si durant el procés s'observa una manca d'humitat a la baieta.

#### **4.2.4 Granulometria per tamisat**

L'assaig de granulometria per tamisat complementarà el SDT. Aquest és un assaig clàssic en la classificació de sòls, i ha estat realitzat segons el procediment normalitzat descrit en la norma UNE 103 101:1995.

L'objectiu de les granulometries és millorar la sensibilitat de l'assaig de durabilitat SDT, així com dels cicles d'envelliment gel-desgel. Els resultats de les correccions granulomètriques sobre l'índex obtingut a l'SDT es presentaran a l'apartat següent resultats, i el motiu de la incorporació de l'assaig granulomètric es justifica i discuteix en l'apartat d'anàlisi i discussió, més endavant.

D'aquesta forma, s'ha realitzat un assaig granulomètric després de cada assaig SDT, així com després de l'envelliment per gel-desgel. Per a això s'ha utilitzat un joc de tamisos, amb obertura de malla normalitzada UNE d'una grandària de 0,08; 0,160; 0,40; 1,25; 2,00; 5,00; 6,30; 10,00; 12,50; 20,00; 25,00 i 40,00.

L'assaig granulomètric s'ha realitzat d'acord al procediment següent:

- ➔ Assecar les mostres en estufa a 110°C, fins a massa constant. Pesar-les i anotar el pes.
- ➔ Passar les mostres a través del joc de tamisos, ordenats de major obertura a menor grandària cap a la base. Vibrar bé els tamisos juntament amb el material per garantir el pas de cada fracció pel seu tamís corresponent.
- ➔ Pesar la fracció de pes retingut en cada tamís, i anotar-ho.
- ➔ Calcular el percentatge retingut en cada fracció, sobre el pes total sec de la mostra i dibuixar la corba corresponent en una representació semilogarítmica.

#### **4.3 CONCLUSIONS METODOLÒGIQUES**

Després de realitzar tot el treball previst, s'ha arribat a unes conclusions que s'exposen a continuació:

- ➔ La major part dels talussos que es troben al camp estan formats per diferents estrats. Per analitzar correctament un talús s'han de caracteritzar, classificar i assajar mostres de cadascun d'aquests estrats diferents, i tractar-les com si formessin un talús de litologia homogènia.
- ➔ La bona conservació de les mostres així com un ràpid processament i preparació per assajar-les, impedeix que aquestes mostres es degradin i no representin correctament a les roques sanes extrems dels talussos al camp.
- ➔ Per a realitzar la classificació dels talussos s'ha tingut en compte el seu aspecte visual en el moment de l'extracció de les mostres, però sobretot ha estat decisiva a l'hora de decidir, la previsió de l'evolució dels talussos al llarg del temps.

- ➔ Les mostres intactes són aquelles que millor representen les condicions de roca matriu o roca sana, que es troben a l'obertura d'un desmunt. Les mostres envellides simulen el comportament del material a mitjà o llarg termini.

## **5 RESULTATS**

### **5.1 RESULTATS DE CAMP**

Com a resultats de camp s'han classificat els desmunts estudiats en funció del seu comportament enfront a l'engrunament i l'erosió superficial. Per a tal cosa, s'ha realitzat un inventari i classificació de talussos excavats en funció de la intensitat dels processos d'alteració i degradació de la seva superfície. L'objectiu d'aquesta classificació tracta de validar els índexs de degradabilitat de les roques toves obtinguts en el laboratori, amb el comportament real dels talussos excavats.

Com ja hem vist a l'apartat d'antecedents, per a realitzar la classificació dels talussos s'utilitzarà la taula implementada per Martínez-Bofill (2011) que utilitza una sèrie de descriptors per establir el comportament dels mateixos. Aquests descriptors permeten d'una manera visual i pràctica classificar els talussos excavats en roques toves en cinc categories:

- Tipus 1: talussos que romanen pràcticament intactes durant el període de vida útil de la infraestructura.
- Tipus 2: talussos que experimenten a mitjà termini un esquarterament esporàdic de la superfície del mateix, amb caigudes ocasionals i els fragments de les quals s'acumulen al peu del talús gairebé sense descompondre's.
- Tipus 3: talussos degradables a mitjà termini, amb un grau d'alteració mitjà. Tendència a recular i caigudes freqüents de blocs (sovint, fractures lístriques). Els fragments caiguts de roca no es descomponen en argila o llim.
- Tipus 4: talussos amb tendència a formar una capa de regòlit en superfície. Dóna lloc a xaragalls, freqüents caigudes de blocs i lliscaments superficials. La roca es descompon en argila o llim.
- Tipus 5: talussos constituïts per argiles i llims pobrament endurits o litificats. Aixaragallament intens de la superfície i formació de lliscaments rotacionals. Les característiques erosives i resistents dels materials no és el resultat d'un procés d'alteració sinó que es tracta de sediments que no han litificat.

Per a realitzar la classificació dels talussos s'han tingut en compte el grau de degradabilitat del front del talús, parant especial atenció al seu aspecte visual en el moment de l'extracció de les mostres. També s'ha considerat quina seria la probable evolució dels talussos al llarg del temps. Per exemple, pot ser que a la classificació d'un talús que s'ha excavat recentment puguin haver-hi dubtes, però aquests poden quedar resolts si s'observa l'evolució de talussos excavats anys abans, pròxims a ell i amb similars litologies. Aquest aspecte ha estat important a la classificació efectuada en aquesta tesina, ja que les visites de camp als talussos de la C-25 es van realitzar poc abans de la posada en servei de la via, després del desdoblament al que va ser sotmesa, i alguns talussos havien estat oberts feia pocs mesos.

Dels diferents talussos estudiats, s'han obtingut mostres representatives. Quan els talussos estaven formats per 2 o més litologies, s'han obtingut mostres de cada nivell representatiu. A cada nivell se li ha assignat el seu valor corresponent en la classificació de talussos, com si fos un sol talús de litologia homogènia, per tal de poder comparar els resultats de laboratori.

La taula 5-1 següent mostra els resultats:

**Taula 5-1.** Classificació de les mostres segons la tipologia de talús.

Mostra	Tipus de talús	Mostra	Tipus de talús
Tona 1.2	3	Gurb 2.1	4
Gurb 1.1	4	Olost 1.1	5
Gurb 1.2	4	Olost 1.2	3
Vic 2.1	2	Olost 1.3	2
Vic 2.2	3	Oristà 1.1	5
Vic 2.3	2	Oristà 1.2	2
Vic 2.4	1	Avinyó 1.1	4
Vic 3.1	2	Fontfreda 1.1	5
Vic 3.2	1		

Cal comentar que hi ha hagut mostres on s'ha dubtat a l'hora de classificar-les, sobretot Gurb 1.1 i Gurb 1.2 entre un tipus 2 i un tipus 3, i Olost 1.1 i Fontfreda 1.1 entre un tipus 4 o un tipus 5. En general, els talussos amb materials d'origen marí es classifiquen en un tipus de talús més durable (tipus 1,2 i 3) que els talussos amb materials d'origen continental (tipus 3,4 i 5). La taula 5-2 fa un recompte del número de talussos que es classifiquen per a cada tipus de talús:



**Taula 5-2.** Quantificació del nombre de talussos per a cada categoria de talús.

Tipus de talús	Nombre de talussos
1	2
2	5
3	3
4	4
5	3

A continuació s'explicarà gràficament, mitjançant fotografies preses al camp, alguns dels principals trets que han permès classificar els talussos d'aquesta manera.

#### Talús tipus I



**Figura 5-1.** Talús pràcticament vertical amb taladres de voladura perfectament conservades i absència d'erosió superficial. Mostra Vic 2.4.

#### Talús tipus II



**Figura 5-2.** Talús de roca lleugerament meteoritzada. Les arestes s'arrodoneixen amb el temps. Mostra Vic 2.3.

#### Talús tipus III



**Figura 5-3.** Talús amb roca meteoritzada a la superfície amb aparició de disjunció nodular i lliscament per fractura lítrica. Mostra Tona 1.2.

#### Talús tipus IV



**Figura 5-4.** Talús recobert per una capa de regòlit d'aspecte terrós amb esquerdes superficials i formació de xaragalls. Mostra Gurb 2.1.

### Talús tipus V



**Figura 5-5.** L'estrat format per lutites argiloses s'ha de classificar com a tipus V, ja que presenta una capa de regòlit important i no apareixen afloraments de roca. Això es degut a que està format per dipòsits argilosos poc consolidats. Mostra Oristà 1.1.

## **5.2 RESULTATS DE LABORATORI**

A continuació es presenten els resultats obtinguts en l'assaig Slake Durability Test (SDT) de les 17 mostres assajades, que han estat preses com ja s'ha comentat en 10 talussos diferents distribuïts en la C-17 i sobretot en la C-25 .

En tots els casos, les mostres han estat sotmeses a 5 cicles de durabilitat en l'assaig de durabilitat Slake Durability Test (SDT), tal com s'ha descrit en l'apartat de metodologia.

Les mostres han estat dividides en 2 grups. El primer grup correspon a mostres intactes que no han estat sotmeses a cap procés d'envelliment previ al seu assaig en SDT. El segon grup de mostres han estat envellides en laboratori prèviament al seu assaig en SDT. Tal com ja s'ha comentat prèviament en l'apartat de metodologia, l'envelliment ha consistit en l'aplicació de 15 cicles de gel-desgel.

Els resultats es presentaran en taules i gràfiques en les quals les mostres s'ordeneran cronològicament segons la seva data de recollida en el camp.

### **5.2.1 Resultats de durabilitat en mostres intactes**

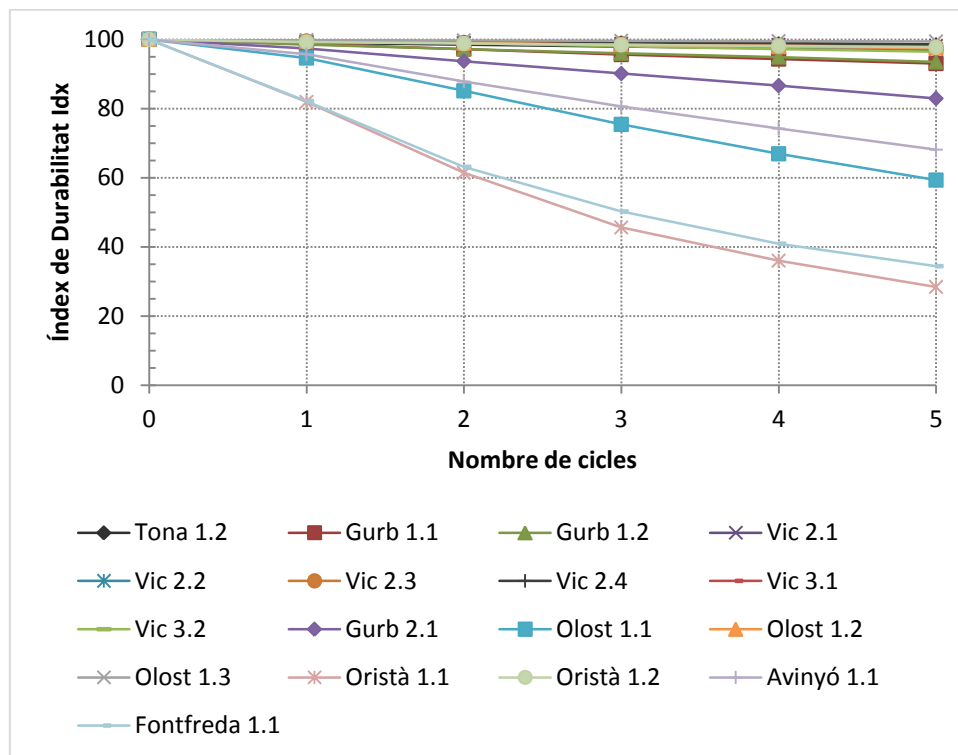
En primera instància s'han assajat les mostres intactes, que no han sofert cap tipus de procés d'envelliment o degradació. Les mostres intactes són, per tant,

aquelles que millor representen les condicions de roca matriu o sana, que trobem en l'obertura d'un desmunt. En la Taula 5-3 es mostren els resultats obtinguts, per a cada mostra en els diferents cicles de desgast realitzats, per ordre cronològic d'obtenció de les mostres en el camp.

**Taula 5-3.** Resultats de l'assaig de durabilitat SDT de les mostres intactes per a cada cicle d'assaig.

Mostra	Id0	Id1	Id2	Id3	Id4	Id5
Tona 1.2	100,0	99,0	98,5	97,9	97,5	96,9
Gurb 1.1	100,0	98,7	97,2	95,6	94,3	93,0
Gurb 1.2	100,0	98,5	97,2	96,0	94,9	93,5
Vic 2.1	100,0	99,3	99,0	98,7	98,4	98,1
Vic 2.2	100,0	99,3	98,8	98,2	97,7	97,2
Vic 2.3	100,0	99,5	99,1	98,8	98,4	98,0
Vic 2.4	100,0	99,7	99,3	99,1	98,9	98,6
Vic 3.1	100,0	99,3	98,9	98,4	98,0	97,6
Vic 3.2	100,0	98,9	98,0	97,2	96,4	95,7
Gurb 2.1	100,0	97,4	93,7	90,1	86,6	82,9
Olost 1.1	100,0	94,6	85,1	75,4	66,9	59,3
Olost 1.2	100,0	99,5	98,9	98,5	97,9	97,5
Olost 1.3	100,0	99,8	99,7	99,6	99,5	99,4
Oristà 1.1	100,0	81,9	61,4	45,6	36,0	28,4
Oristà 1.2	100,0	99,2	98,8	98,4	98,1	97,7
Avinyó 1.1	100,0	95,7	87,8	80,6	74,2	68,1
Fontfreda 1.1	100,0	82,1	63,1	50,2	40,9	34,4

En la gràfica 5-1 es mostra la distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres inicialment intactes.



**Gràfica 5-1.** Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes.

Els resultats de les mostres presenten poca variabilitat en la seva majoria, amb valors Id5 superiors a 90 per 12 de les 17 mostres i fins i tot superiors a 95 en 10 d'aquestes 12. Per tant, 10 mostres presenten una durabilitat molt alta, amb un índex superior al 95 per al cinquè cicle; 2 mostres presenten una durabilitat alta amb Id5 entre 90 i 95; 1 mostra de durabilitat mitjana-alta amb un Id5 comprès entre 80 i 90; 1 mostra de durabilitat mitjana amb un Id5 entre 60 i 80; 1 mostra presenta durabilitat baixa amb un Id5 comprès entre 40 i 60, i finalment 2 mostres amb durabilitat molt baixa i un Id5 inferior a 40. Aquestes dades es veuen millor reflectides en la taula següent:

**Taula 5-4.** Nombre de mostres per a cada categoria de durabilitat segons el valors d'Id5. Martínez-Bofill (2011).

Grau de durabilitat	Valors d'Id5	Nombre de mostres
Molt alta	>95	10
Alta	90-95	2
Mitjana-alta	80-90	1
Mitjana	60-80	1
Baixa	40-60	1
Molt baixa	<40	2

Si analitzem les dades de durabilitat corresponents al segon cicle d'assaig, també conegut com a Índex Sehudes, 13 mostres presenten valors de durabilitat superiors a 90 d'entre les quals 12 d'elles presenten índexs de durabilitat superiors a 95.

D'altra banda, podem trobar mostres de gran durabilitat que mantinguin la seva forma inicial pràcticament intacta, i mostres que es fragmentin completament però en fragments de grandària major a 2,0 mm. En tots dos casos les mostres obtenen un mateix valor de durabilitat però presenten un comportament molt diferent en un talús. Per resoldre aquesta falta de sensibilitat de l'assaig SDT, s'ha decidit realitzar la granulometria de la mostra assajada, com ja s'ha explicat en l'apartat de metodologia i els resultats del qual es presenten en els annexos. Una vegada realitzada la granulometria s'ha corregit l'índex de durabilitat  $I_{D5}$  per així observar que encara que la mostra es mantingui dins del tambor amb malla de 2,0 mm propi de l'assaig SDT, això no vol dir que no es trenqui en trossos més grans. Per a això s'ha usat com a valor índex de referència el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 2,0 mm, 10,0 mm, 12,5 mm i 20 mm, sobre la mostra retinguda pel tambor després de la realització del cinquè cicle de durabilitat ( $I_{D5}$ ) en SDT. El valor corregit s'obté com un percentatge, segons l'Equació 5-1, detallada per al sedàs 2,0 mm. Per als altres tres sedassos el procediment és el mateix.

$$I_{D5 \text{ Corregit}(2\text{mm})} = (I_{D5} \cdot (100 - \% \text{ passa sedàs } 2,0 \text{ mm})) / 100 \quad \text{Equació 5-1}$$

En la Taula 5-5 i en la Taula 5-6, es mostren els valors de durabilitat  $I_{D5}$  corregits segons el percentatge de fracció que passa pel tamís corresponent.

**Taula 5-5.** Valors de durabilitat  $I_{D5}$  corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 2,0mm i 10,0mm.

MOSTRA	$I_{D5}$ nc	% passa sedàs 2,0 mm	% passa sedàs 10,0 mm	$I_{D5}$ corregit (2)	$I_{D5}$ corregit (10)	Tipus de talús
Tona 1.2	96,9	0,0	0,0	96,9	96,9	3
Gurb 1.1	93,0	0,0	0,0	93,0	93,0	4
Gurb 1.2	93,5	0,0	0,6	93,5	92,9	4
Vic 2.1	98,1	0,0	0,0	98,1	98,1	2
Vic 2.2	97,2	0,0	0,3	97,2	97,0	3
Vic 2.3	98,0	0,0	0,1	98,0	97,9	2
Vic 2.4	98,6	0,0	0,0	98,6	98,6	1
Vic 3.1	97,6	0,0	0,0	97,6	97,6	2

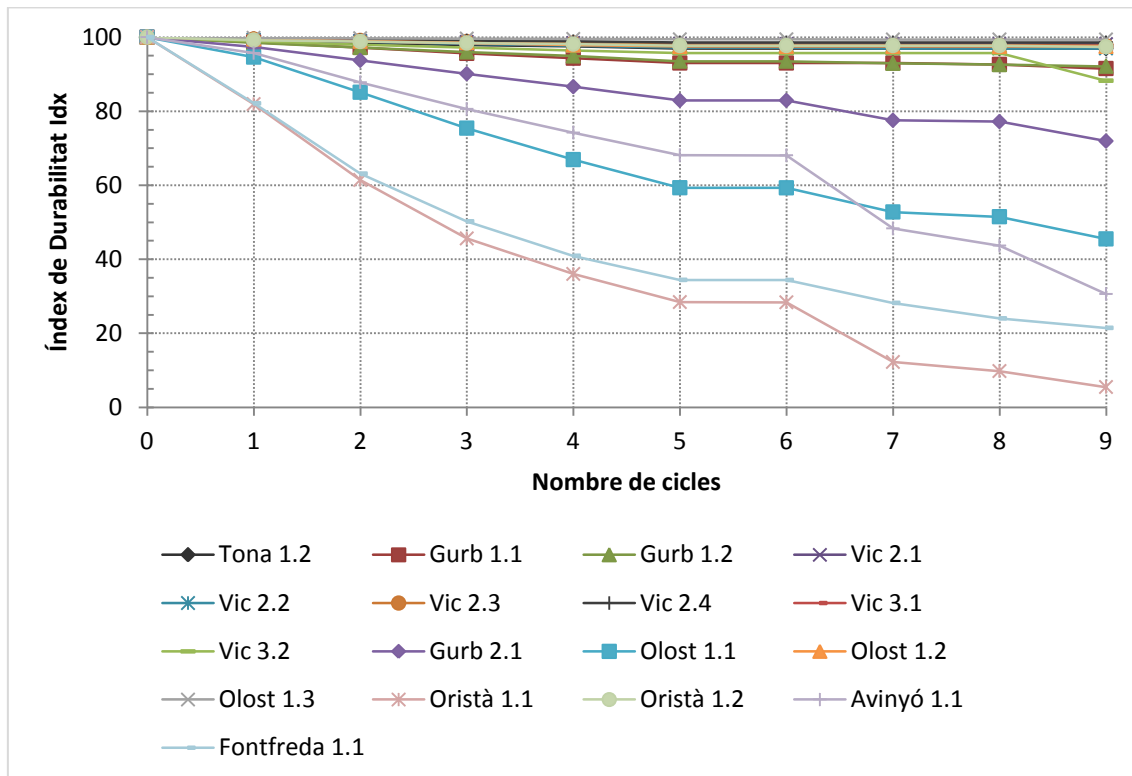
Vic 3.2	95,7	0,0	0,0	95,7	95,7	1
Gurb 2.1	82,9	0,0	6,5	82,9	77,5	4
Olost 1.1	59,3	0,0	11,0	59,3	52,8	5
Olost 1.2	97,5	0,0	0,0	97,5	97,5	3
Olost 1.3	99,4	0,0	0,0	99,4	99,4	2
Oristà 1.1	28,4	0,2	57,0	28,3	12,2	5
Oristà 1.2	97,7	0,0	0,0	97,7	97,7	2
Avinyó 1.1	68,1	0,0	29,0	68,1	48,3	4
Fontfreda 1.1	34,4	0,1	18,1	34,4	28,2	5

**Taula 5-6.** Valors de durabilitat Id5 corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 12,5mm i 20,0mm.

<b>MOSTRA</b>	<b>Id5 nc</b>	<b>% passa sedàs 12,5 mm</b>	<b>% passa sedàs 20,0 mm</b>	<b>Id5 corregit (12,5)</b>	<b>Id5 corregit (20)</b>	<b>Tipus de talús</b>
Tona 1.2	96,9	0,0	0,0	96,9	96,9	3
Gurb 1.1	93,0	0,4	1,6	92,6	91,5	4
Gurb 1.2	93,5	1,0	1,5	92,6	92,1	4
Vic 2.1	98,1	0,0	0,0	98,1	98,1	2
Vic 2.2	97,2	0,3	0,3	97,0	97,0	3
Vic 2.3	98,0	0,1	0,3	97,9	97,7	2
Vic 2.4	98,6	0,0	0,0	98,6	98,6	1
Vic 3.1	97,6	0,0	0,0	97,6	97,6	2
Vic 3.2	95,7	0,0	7,8	95,7	88,2	1
Gurb 2.1	82,9	6,9	13,3	77,2	71,9	4
Olost 1.1	59,3	13,2	23,3	51,5	45,5	5
Olost 1.2	97,5	0,0	0,0	97,5	97,5	3
Olost 1.3	99,4	0,0	0,0	99,4	99,4	2
Oristà 1.1	28,4	65,6	80,8	9,8	5,5	5
Oristà 1.2	97,7	0,0	0,3	97,7	97,4	2
Avinyó 1.1	68,1	35,9	55,1	43,7	30,6	4
Fontfreda 1.1	34,4	30,3	37,7	24,0	21,4	5

En la gràfica 5-2 s'ha representat la distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, en les mostres intactes, afegint la correcció al valor Id5 per 2,0 mm, 10,0 mm, 12,5 mm i 20,0 mm.





**Gràfica 5-2.** Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes, afegint la correcció al valor Id5 per 2,0mm (cicle 6), 10,0mm (cicle 7), 12,5mm (cicle 8) i 20,0mm (cicle 9).

## 5.2.2 Resultats de durabilitat de les mostres envellides en cicles gel-desgel

### 5.2.2.1 *Procés d'Envelliment en Gel-Desgel*

Tal com s'ha descrit prèviament en l'apartat de metodologia, les mostres han estat sotmeses a un envelliment mitjançant 15 cicles de gel-desgel, previ al seu assaig de durabilitat en SDT. Per realitzar els cicles d'envelliment, es procedeix prèviament a submergir les mostres durant 24 hores en una solució aquosa d'alcohol isopropil al 0,5%. En aquest procés d'immersió ja s'observa un ràpid inici del procés d'esquerdament i engrunament en algunes mostres, que coincideixen amb les mostres de menor durabilitat en els resultats de l'assaig SDT per a mostres inicialment intactes. A la figura 5-6 següents es mostra com hi ha materials que no s'han degradat (Vic 2.1), materials on s'han produït esquerdes i trencades en alguns blocs (Gurb 2.1) i materials que han tingut varis trossos trencats i a la figura 5-7, materials que s'han anat desfent.





**Figura 5-6.** Aspecte de les mostres Vic 2.1 i Gurb 2.1 després de submergir-les en alcohol isopropílic.



**Figura 5-7.** Aspecte de la mostra Fontfreda 1.1 després de submergir-la en alcohol isopropílic.

Una vegada acabats els cicles d'envelliment per gel-desgel, s'ha observat l'estat de les mostres i s'ha pres nota del mateix.

- ➔ Tona 1.2: 2 cubs presenten fractures (una pel mig i l'altra a una aresta). Cinc cubs presenten esquerdes pel mig dels mateixos, encara que es manté la mida original.
- ➔ Gurb 1.1: 2 cubs amb fractures semblants a les de la mostra Tona 1.2. Altres 2 cubs presenten esquerdes però es manté la forma.
- ➔ Gurb 1.2: Presenten fractures amb fragments grans (entre una tercera part i la meitat del cub). També hi ha esquerdes a un parell de cubs que s'han trencat

pels vèrtexs i no pel mig. Els fragments resultants s'han trencat en altres més petits, excepte en 5 trossos que mantenen la mida (figura 5-8).



**Figura 5-8.** Mostra fracturada en trossos grans després dels cicles de gel-desgel.

→ Vic 2.1: Fragments intactes a simple vista (figura 5-9).



**Figura 5-9.** Mostra pràcticament intacta després dels cicles de gel-desgel.

→ Vic 2.2: Fragments intactes a simple vista.

→ Vic 2.3: Fragments intactes a simple vista.

→ Vic 2.4: Fragments intactes a simple vista.

→ Vic 3.1: Fragments intactes a simple vista.

→ Vic 3.2: Aparició d'esquerdes (una per cub) a cinc cubs. La resta intactes.

- Gurb 2.1: Mostra molt fragmentada. Els trossos resultants són “xips”, llesques de mida petita o molt petita i primes (figura 5-10).



**Figura 5-10.** Mostra trencada en trossos en forma de “xips” després dels cicles gel-desgel.

- Olost 1.1: Mostra molt fragmentada. Es descompon en fragments petits i també en fang. Gairebé no es manté la morfologia original.
- Olost 1.2: Cub número 1 amb trencada de fragment gran. La resta de cubs amb trencades petites generalment als vèrtex i les arestes.
- Olost 1.3: Fragments intactes a simple vista.
- Oristà 1.1: Mostra molt desfeta i fragmentada. Els fragments s’han descompost en gran part i gairebé no mantenen la morfologia original.
- Oristà 1.2: Fragments intactes a simple vista.
- Avinyó 1.1: Mostra molt fragmentada. Es descompon en fragments petits i també en fang. Gairebé no es manté la morfologia original.
- Fontfreda 1.1: Mostra molt desfeta i fragmentada. Els fragments s’han descompost en gran part i gairebé no mantenen la morfologia original (figura 5-11).



**Figura 5-11.** Mostra molt desfeta després dels cicles de gel-desgel.

Per quantificar la pèrdua de massa durant l'assaig d'envelliment en cicles de gel-desgel, s'han pesat les mostres abans i després de l'assaig. Els resultats en tant per cent de pèrdua de massa, en les mostres que posteriorment seran sotmeses a l'assaig SDT, es presenten en la taula 5-7. S'observa com era previsible que les mostres més degradables són les que més han disminuït la seva massa. Aquesta diferència de massa entre les mostres intactes i les mostres ja sotmeses a l'envelliment per gel-desgel, provoca que els valors d'Id5 obtinguts en assajar aquestes mostres mitjançant l'assaig SDT posterior, no es calculin respecte a la massa inicial de les mostres. Per tant, haurem de corregir els valors de l'índex (Id5) perquè es refereixin a la pèrdua de massa de les mostres durant el procés de durabilitat complet, obtenint uns nous índexs als quals s'anomenaran Id5 envellits. Aquests resultats es presenten en l'apartat corresponent a l'assaig SDT amb mostres envellides per cicles de gel - desgel.

**Taula 5-7.** Percentatges de pèrdua en pes total després dels cicles de gel-desgel.

<b>Mostra</b>	<b>% pèrdua gel - desgel</b>	<b>Mostra</b>	<b>% pèrdua gel - desgel</b>
Tona 1.2	1,5%	Gurb 2.1	3,8%
Gurb 1.1	3,5%	Olost 1.1	3,9%
Gurb 1.2	3,6%	Olost 1.2	0,9%
Vic 2.1	1,0%	Olost 1.3	0,4%
Vic 2.2	1,2%	Oristà 1.1	2,8%
Vic 2.3	1,1%	Oristà 1.2	1,5%
Vic 2.4	0,8%	Avinyó 1.1	3,2%
Vic 3.1	0,9%	Fontfreda 1.1	2,8%
Vic 3.2	1,2%		

D'altra banda, una vegada descomptada la pèrdua de massa per l'envelliment en cicles de gel-desgel, s'ha volgut saber quina quantitat de la mostra s'ha trencat en

trossos menors a 2 mm i per tant passarà pel tambor de l'assaig SDT en el primer cicle majorment (taula 5-8). Expressat d'una altra manera, aquest percentatge de la mostra no es vorà influït per l'assaig de durabilitat SDT, ja que amb prou feines començant el primer cicle es desprendreà del tambor. Per quantificar aquesta fracció menor de 2 mm s'ha realitzat una granulometria mitjançant tamisat, d'acord amb la norma UNE 103 101 : 1995. Els resultats es presenten a continuació:

**Taula 5-8.** Percentatge de pèrdua de material tamisat amb el sedàs de 2,0mm, després dels cicles gel-desgel.

<b>Mostra</b>	<b>% pèrdua G-D sedàs 2mm</b>	<b>Mostra</b>	<b>% pèrdua G-D sedàs 2mm</b>
Tona 1.2	0,0%	Gurb 2.1	7,6%
Gurb 1.1	0,3%	Olost 1.1	59,7%
Gurb 1.2	0,8%	Olost 1.2	0,1%
Vic 2.1	0,0%	Olost 1.3	0,0%
Vic 2.2	0,0%	Oristà 1.1	59,8%
Vic 2.3	0,0%	Oristà 1.2	0,0%
Vic 2.4	0,0%	Avinyó 1.1	13,4%
Vic 3.1	0,0%	Fontfreda 1.1	69,4%
Vic 3.2	0,0%		

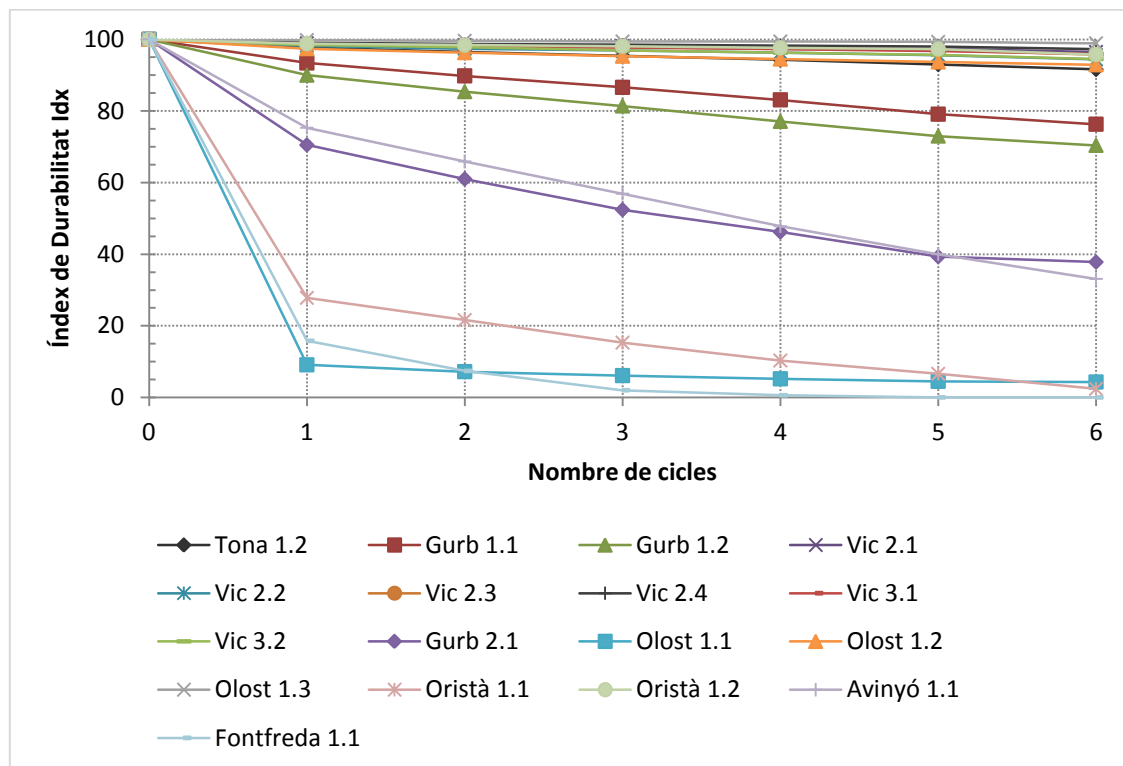
En la majoria de les mostres, la pèrdua de material que passa és inferior al 1% i solament en 3 mostres (Olost 1.1, Oristà 1.1 i Fontfreda 1.1) la quantitat resulta considerable. Per tant, segons l'assaig d'envelliment per cicles de gel-desgel la gran majoria de mostres s'haurien de classificar com no degradables, mentre que el seu comportament observat en els talussos és d'elevada degradabilitat. Per tant, cal concloure que l'assaig d'envelliment per gel-desgel, utilitzant el pas de malla normalitzat de 2,0 mm, no és representatiu de la degradabilitat dels desmunts. És més, la majoria de les mostres no és que s'hagin trencat en trossos majors a 2 mm, és que mantenen la seva forma cúbica inicial. Així doncs, podem concloure que l'assaig de durabilitat mitjançant cicles gel-desgel, no és suficient per si sol per caracteritzar aquesta durabilitat en les roques toves. Un altre tema és si serveix com a complement, atès que simula la degradació que sofreixen les roques en la seva ubicació natural, per a un estudi de durabilitat que inclogui l'assaig SDT. Això s'analitzarà en el següent apartat, anàlisi i discussió.

### 5.2.2.2 Durabilitat en SDT de les mostres envellides en gel-desgel

Una vegada sotmeses les mostres al procés d'envelliment en gel-desgel, s'ha procedit a assajar-les en l'equip SDT. En la taula 5-9 es mostren els resultats dels diferents índexs de durabilitat (Idx) corresponents a cadascun dels cicles realitzats. Com s'ha comentat en el procés d'envelliment per gel-desgel, perquè els índexs Id5 calculats es refereixin a la massa inicial del procés de durabilitat i no a la massa inicial de l'assaig SDT, s'han corregit i s'han reanomenat com Id5 envellits. A la gràfica 5-3 es representen els valors de durabilitat per a cada cicle d'assaig i l'Id5 envellit.

**Taula 5-9.** Resultats dels índex de durabilitat als diferents cicles realitzats i correcció de l'Id5 (Id5 envellit).

Mostra	Id0	Id1	Id2	Id3	Id4	Id5	Id5 envellit
Tona 1.2	100,0	97,7	96,5	95,4	94,3	93,0	91,6
Gurb 1.1	100,0	93,4	89,8	86,6	83,1	79,1	76,3
Gurb 1.2	100,0	90,0	85,4	81,4	77,1	73,0	70,4
Vic 2.1	100,0	98,9	98,4	98,1	97,8	97,4	96,5
Vic 2.2	100,0	98,2	97,4	96,9	96,3	95,6	94,4
Vic 2.3	100,0	98,6	98,1	97,8	97,4	96,9	95,8
Vic 2.4	100,0	99,1	98,7	98,5	98,3	98,0	97,3
Vic 3.1	100,0	98,7	98,1	97,7	97,3	96,7	95,9
Vic 3.2	100,0	98,4	97,8	96,9	96,3	95,7	94,5
Gurb 2.1	100,0	70,5	61,0	52,4	46,2	39,3	37,8
Olost 1.1	100,0	9,1	7,2	6,1	5,2	4,5	4,3
Olost 1.2	100,0	97,4	96,3	95,3	94,5	93,7	92,9
Olost 1.3	100,0	99,8	99,6	99,4	99,4	99,3	98,9
Oristà 1.1	100,0	27,8	21,6	15,3	10,3	6,6	2,4
Oristà 1.2	100,0	98,8	98,4	98,1	97,6	97,3	95,8
Avinyó 1.1	100,0	75,3	65,9	56,9	47,8	40,0	33,1
Fontfreda 1.1	100,0	15,8	7,4	2,0	0,6	0,0	0,0



**Gràfica 5-3.** Representació del valor mesurat de durabilitat per a cada cicle d'assaig de desgast amb SDT, i valors de l'Id5 envellit (cicle 6).

Els resultats de les mostres presenten una mica més de variabilitat que els de les mostres intactes sotmeses a SDT. Per observar-ho millor, s'ha compost una taula anàloga a la realitzada per a l'apartat de durabilitat en mostres intactes vist anteriorment.

**Taula 5-10.** Quantificació del nombre de mostres per a cada interval del grau de durabilitat. Martínez-Bofill, J. (2011).

Grau de durabilitat	Valors d'Id5	Nombre de mostres
Molt alta	>95	6
Alta	90-95	4
Mitjana-alta	80-90	0
Mitjana	60-80	2
Baixa	40-60	0
Molt baixa	<40	5

Com podem observar comparant la taula 5-10 amb la taula referent al grau de durabilitat de l'apartat per a mostres intactes (taula 5-4), hi ha hagut una disminució general en els valors d'Id5. Algunes de les mostres (40%) que abans presentaven un grau de durabilitat molt alt, ara obtenen un valor de durabilitat important però classificable simplement com a alt. D'igual manera, les mostres que obtenien graus de



durabilitat alts han disminuït el seu valor de durabilitat fins a ser classificada com a mitjana. Per últim, les mostres que abans omplien la taula des d'una durabilitat mitjana-alta fins a molt baixa, han sofert un decreixement a causa de la combinació de l'envelliment per gel-desgel i el SDT fins a nivells de grau de durabilitat molt baixos.

Si analitzem els valors de l'Índex de Sehudes, 10 mostres presenten valors majors a 95, mentre que amb el SDT per a mostres intactes seran 12. Per tant, no hi ha una variació tan important en la durabilitat calculada en el segon cicle però aquesta variació augmenta en augmentar el nombre de cicles.

A continuació es presentaran els resultats de la correcció de l'índex  $I_{D5}$  (taula 5-11, taula 5-12 i gràfica 5-4), anàloga a la realitzada per a l'assaig de durabilitat SDT per a mostres intactes. És a dir, han estat obtinguts mitjançant SDT després de realitzar una granulometria i calcular el tant per cent que passa per als tamisos UNE 2,0 mm, 10,0 mm, 12,5 mm i 20 mm. L'equació utilitzada per al càlcul és l'equació 5-1.

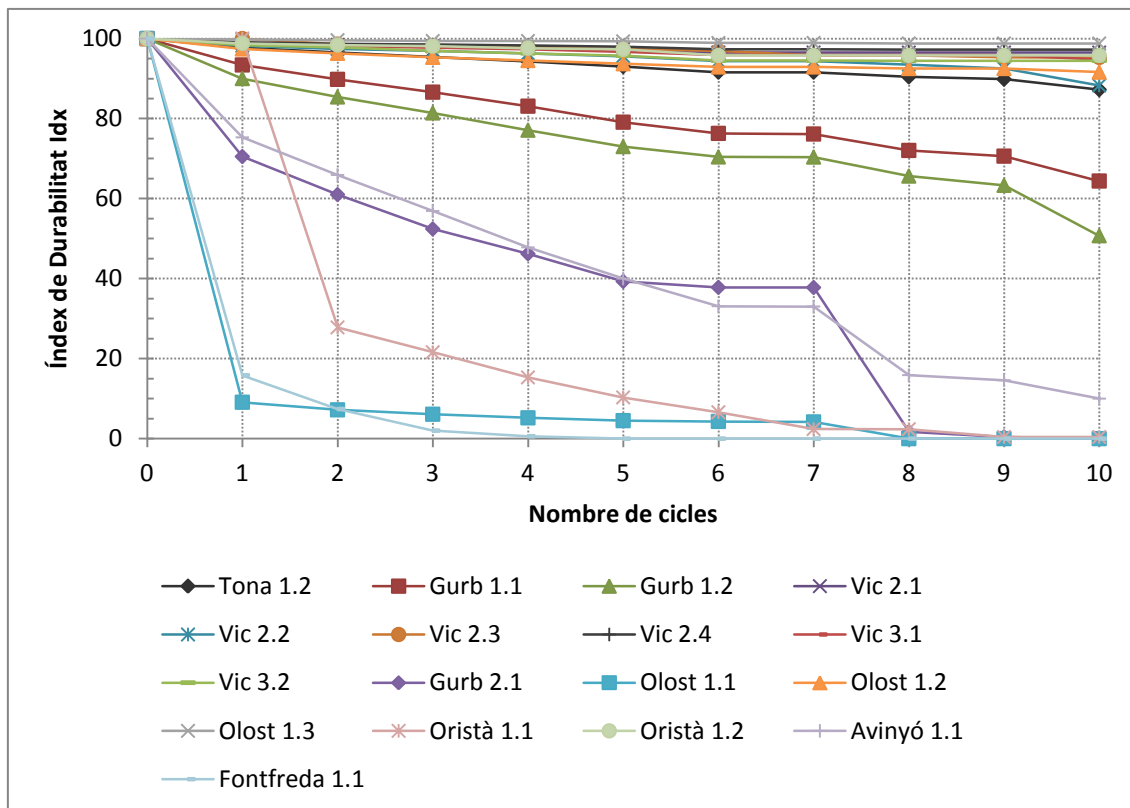
**Taula 5-11.** Valors de durabilitat  $I_{D5}$  corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 2,0mm i 10,0mm, per a mostres envellides.

MOSTRA	$I_{D5}$ nc	% pasa sedàs 2,0 mm	% pasa sedàs 10,0 mm	$I_{D5}$ corregit (2)	$I_{D5}$ corregit (10)	Tipus de talús
Tona 1.2	91,6	0,0	1,3	91,6	90,4	3
Gurb 1.1	76,3	0,2	5,6	76,1	72,0	4
Gurb 1.2	70,4	0,0	6,8	70,4	65,6	4
Vic 2.1	96,5	0,0	0,0	96,5	96,5	2
Vic 2.2	94,4	0,0	0,9	94,4	93,5	3
Vic 2.3	95,8	0,0	0,5	95,8	95,3	2
Vic 2.4	97,3	0,0	0,0	97,3	97,3	1
Vic 3.1	95,9	0,0	0,0	95,9	95,9	2
Vic 3.2	94,5	0,0	0,0	94,5	94,5	1
Gurb 2.1	37,8	0,1	95,5	37,8	1,7	4
Olost 1.1	4,3	2,8	100,0	4,2	0,0	5
Olost 1.2	92,9	0,0	0,4	92,9	92,5	3
Olost 1.3	98,9	0,0	0,1	98,9	98,8	2
Oristà 1.1	2,4	1,6	83,1	2,4	0,4	5
Oristà 1.2	95,8	0,0	0,0	95,8	95,8	2
Avinyó 1.1	33,1	0,2	52,1	33,0	15,9	4
Fontfreda 1.1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5



**Taula 5-12.** Valors de durabilitat Id5 corregits segons el percentatge de fracció que passa pels sedassos UNE 12,5mm i 20,0mm, per a mostres envellides.

MOSTRA	Id5 nc	% pasa sedàs 12,5 mm	% pasa sedàs 20,0 mm	Id5 corregit (12,5)	Id5 corregit (20)	Tipus de talús
Tona 1.2	91,6	1,9	4,8	89,8	87,2	3
Gurb 1.1	76,3	7,5	15,6	70,6	64,4	4
Gurb 1.2	70,4	10,1	28,0	63,3	50,7	4
Vic 2.1	96,5	0,0	0,0	96,5	96,5	2
Vic 2.2	94,4	2,0	6,5	92,5	88,3	3
Vic 2.3	95,8	0,6	0,6	95,3	95,3	2
Vic 2.4	97,3	0,0	0,0	97,3	97,3	1
Vic 3.1	95,9	0,0	1,2	95,9	94,8	2
Vic 3.2	94,5	0,0	0,0	94,5	94,5	1
Gurb 2.1	37,8	98,9	100,0	0,4	0,0	4
Olost 1.1	4,3	100,0	100,0	0,0	0,0	5
Olost 1.2	92,9	0,4	1,4	92,5	91,6	3
Olost 1.3	98,9	0,1	0,1	98,8	98,8	2
Oristà 1.1	2,4	83,1	100,0	0,4	0,0	5
Oristà 1.2	95,8	0,0	0,0	95,8	95,8	2
Avinyó 1.1	33,1	55,9	69,8	14,6	10,0	4
Fontfreda 1.1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5



**Gràfica 5-4.** Representació de la distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, en les mostres envellides, afegint la correcció de l'Id5 envellit (cicle 6) i la correcció al valor Id5 per 2,0 mm (cicle 7), 10,0 mm (cicle 8), 12,5 mm (cicle 9) i 20,0 mm (cicle 10).

## 6 ANÀLISI I DISCUSSIÓ

Un cop recopilats els resultats a l'apartat anterior (apartat 5 - Resultats), es procedirà a comentar-los i analitzar-los. Es tindran en compte tant els cicles de durabilitat als que han estat sotmeses les 17 mostres, com la descripció i classificació dels talussos corresponents.

L'anàlisi en aquest apartat es dividirà en tres parts. En primer lloc s'estudiaran els resultats obtinguts a partir de l'assaig de durabilitat SDT, tant a les 17 mostres intactes com a les 17 mostres envellides mitjançant l'assaig d'envelliment per cicles de gel-desgel. En principi, com que les mostres intactes són les que no han sofert ningun tipus de procés d'envelliment o degradació, representen les condicions de roca matriu o roca sana que es troben a l'obertura dels desmunts, mentre que les mostres envellides representen el comportament del mateix desmunt a mitjà o llarg termini.

En segon lloc, incorporarem els resultats obtinguts per Martinez-Bofill, J.(2011) que va sotmetre unes mostres provinents d'Euskadi als mateixos assajos de durabilitat que s'han aplicat a les mostres analitzades en aquesta tesina. Així doncs, es compararan aquests resultats amb els obtinguts a l'apartat 5 (Resultats) del present treball i amb l'anàlisi fet al primer punt d'aquest apartat, amb l'objectiu de tenir més ferramentes a l'hora de poder predir el comportament dels talussos a mitjà/llarg termini.

Per últim s'incorporarà el Desintegration Ratio (DR), un altre índex de durabilitat proposat per Erguler, Z. A. & Shakoor, A. (2009) per veure si per ell sol pot classificar els talussos o si més no, pot servir com una eina complementària per a tal efecte.

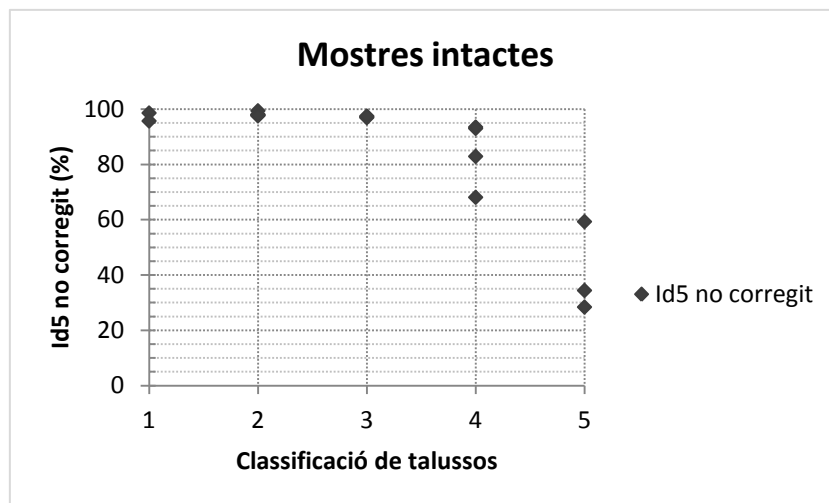
### 6.1 ANÀLISI DE RESULTATS DE LES MOSTRES ASSAJADES

#### 6.1.1 Anàlisi de la durabilitat per a les mostres intactes

Com ja s'ha comentat a l'apartat d'introducció i objectius, la finalitat de l'anàlisi del present estudi és la caracterització i predicció del comportament dels talussos excavats (o per excavar) en roques argiloses, mitjançant l'ús de l'assaig Slake Durability Test.

Per a aquest efecte, es volen establir uns intervals per als valors de l'índex Id5 que permetin classificar un material dintre d'una tipologia de talús, després d'haver-lo sotmès a l'assaig SDT. Un cop establerta la tipologia del talús en qüestió, l'enginyer projectista sabrà en quin tipus de terreny es troba la infraestructura que es vulgui mantenir/construir i per tant adoptarà les mesures oportunes.

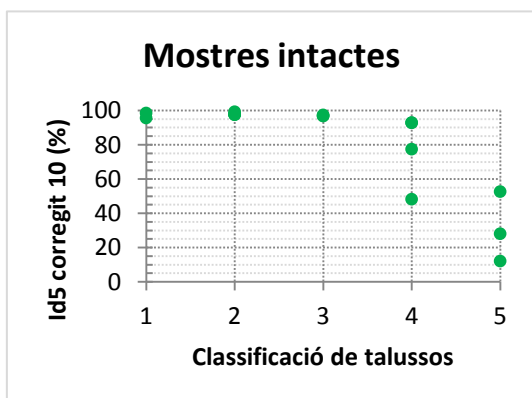
Així doncs, s'ha confrontat la classificació dels talussos que sofreixen engrunament i erosió superficial amb els resultats obtinguts a l'assajar les mostres amb l'SDT. S'observa que la durabilitat de les mostres, expressada per l'índex Id5 sobre mostra intacta, tendeix a esglaonar-se d'una forma coherent segons quina sigui la tipologia de classificació del talús, tal i com es veu a la gràfica següent:



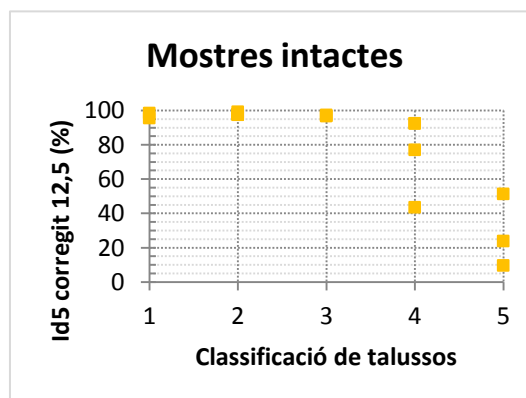
**Gràfica 6-1.** Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos per a les mostres intactes.

Aquesta tendència a esglaonar-se permet veure com s'agrupen els diferents valors de l'Id5 i com es separen les categories de talussos 4 i 5. Encara que el límit inferior de l'interval dels valors d'Id5 per a talussos de tipus 4 i el límit superior de l'interval dels valors d'Id5 per a talussos tipus 5 no quedi totalment delimitat, es pot concloure que per a valors d'Id5 inferiors al 60% aproximadament la mostra correspondria a un talús tipus 5. En quan a la separació dels talussos tipus 1,2 i 3 i els talussos tipus 4, es fa més difícil concretar un límit superior per als talussos tipus 4 degut a la concentració de valors d'Id5 al voltant del 95% (més concretament entre el 93 i el 97%).

Per intentar trobar aquesta separació entre els valors d'Id5 que caracteritzen els talussos tipus 1,2 i 3 i els tipus 4, s'han aplicat unes correccions sobre l'índex Id5. Aquestes correccions comptabilitzen la fracció retinguda dintre del tambor del SDT després del cinquè cicle, que és menor de 2,0mm, 10,0mm, 12,5mm i 20mm respectivament. Les fraccions retingudes computen com a material no perdut durant l'assaig, falsejant l'índex, que obté valors de durabilitat més alts que els observables als materials al seu medi natural. Les figures següents mostren els valors d'Id5 per a les correccions de 10 i 12,5mm per a mostres intactes:



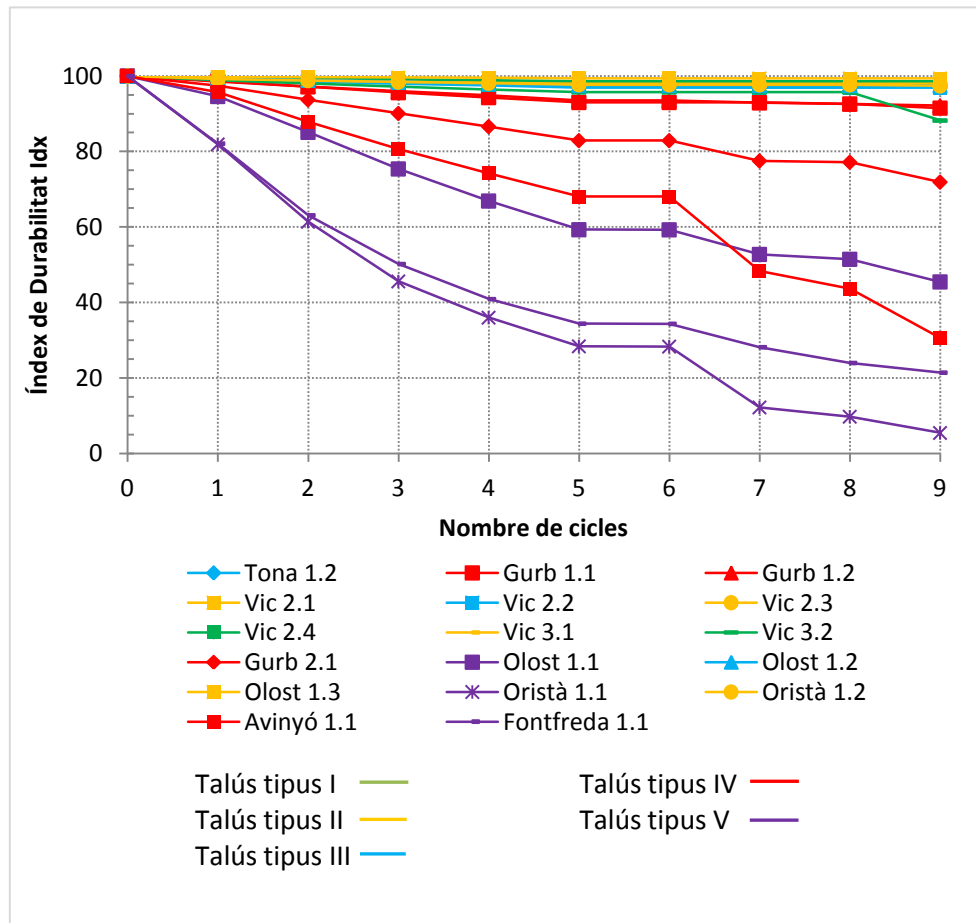
Gràfica 6-2. Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 10,0mm, respecte a la tipologia de talús.



Gràfica 6-3. Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 12,5mm, respecte a la tipologia de talús.

Tal i com s'observa, les gràfiques de l'Id5 corregit 10 i l'Id5 corregit 12,5 no aporten una millora per a la separació entre els tipus de talussos comentats abans i a més provoquen un solapament entre els valors de l'Id5 per als talussos tipus 4 i 5. Així doncs, per a mostres intactes no té gaire sentit aplicar les correccions esmenades ja que no impliquen una major informació pel que fa a la classificació de les mostres. La gràfica de la correcció de l'Id5 amb el sedàs de 2,0mm no s'ha adjuntat degut a que les diferències apreciables amb la gràfica de l'Id5 no corregit (mostrada anteriorment en aquest apartat) no són gens significatives. La gràfica de la correcció de l'Id5 amb el sedàs de 20,0mm, tampoc s'ha adjuntat per que s'ha considerat que l'obertura del sedàs és pràcticament igual a la dimensió dels costats dels cubs preparats per a assajar, i per tant amb petites fractures (provocades per algun cop a dintre del tambor, però que no tenen a veure amb processos de degradació) els cubs poden passar al sedàs següent. Aleshores no computarien com a retingut per al càlcul de l'Id5 corregit amb el sedàs 20,0mm i donarien una idea de la degradabilitat del material errònia.

A continuació es presenta la gràfica 6.4 de la que es pot extreure una visió més global sobre l'evolució de l'índex de durabilitat del SDT per a mostres intactes, des del primer cicle de l'assaig fins al cinquè cicle i les correccions realitzades. Aquesta gràfica ja s'havia incorporat a l'apartat de resultats però amb la diferència en que aquí es presenta amb les mostres separades per tipologia de talús, per poder classificar-les si és possible.



**Gràfica 6-4.** Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes, afegint la correcció al valor Id5 per 2,0mm (cicle 6), 10,0mm (cicle 7), 12,5mm (cicle 8) i 20,0mm (cicle 9). Les corbes estan classificades per tipologia de talús.

Amb aquesta gràfica es confirmen les conclusions extretes respecte als valors de l'Id5 sense corregir i corregit, per a mostres intactes. Un altre índex de durabilitat utilitzat de manera comú és l'Id2 (Índex Sehudes). Aquest índex no s'ha trobat adient considerar-lo per que el seu rang de valors a les mostres estudiades és clarament més petit (entre 61,4 i 99,7%) que el de l'Id5 (entre 28,4 i 99,4%). Per tant a major nombre de cicles, millor discriminació del comportament.

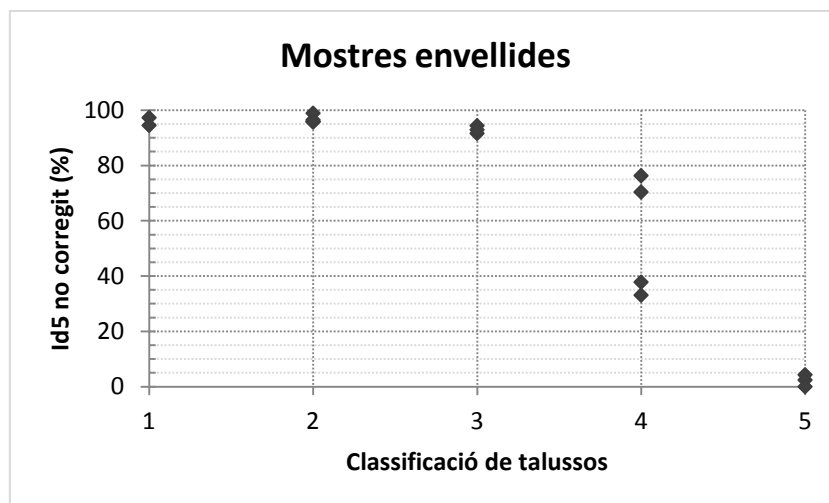
Per tal de millorar la capacitat predictiva del SDT, les mostres han estat sotmeses a un procés d'envelliment mitjançant cicles de gel-desgel, per a posteriorment assajar la seva durabilitat, com ja s'ha comentat a l'apartat 4 - Metodologia.

### 6.1.2 Anàlisi de la durabilitat per a les mostres envellides amb gel-desgel

A l'apartat 5 s'ha vist que l'assaig d'envelliment per cicles de gel-desgel utilitzant el tamís de 2mm, no és representatiu de la degradabilitat dels desmunts. Però no obstant això ara es comprovarà si és un assaig que juntament amb l'SDT és útil per predir el comportament dels materials.

En primer lloc cal recordar que l'índex Id5 calculat després de assajar les mostres amb l'SDT, s'ha corregit per a que es refereixi a la mostra inicial abans dels cicles gel-desgel i així aquest nou índex (que s'ha anomenat Id5 envellit) representi la degradació que han sofert les mostres durant tot el procés d'anàlisi de durabilitat. Per tant, en aquest apartat sempre que s'anomeni l'Id5 a les gràfiques s'estarà fent referència a l'Id5 envellit.

Un cop aclarit això, es passarà a comentar la gràfica 6.5 en la que es classifiquen les mostres segons el tipus de talús i amb el seu Id5 envellit.



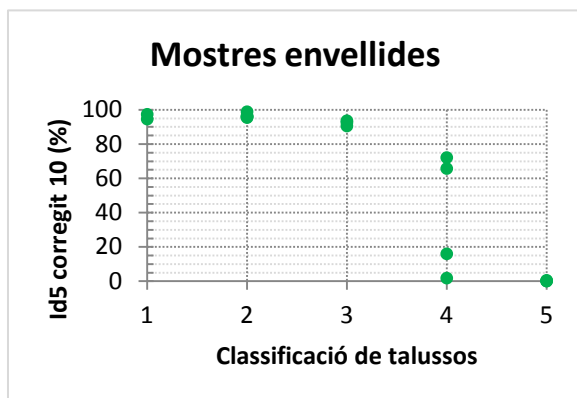
**Gràfica 6-5.** Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos, per a les mostres envellides.

Si comparem aquesta gràfica amb la gràfica anàloga per a les mostres intactes ja analitzada, veiem com és lògic una disminució per als valors d'Id5 envellit en cadascun dels tipus de talussos. Els valors dels talussos tipus 5 cauen fins a

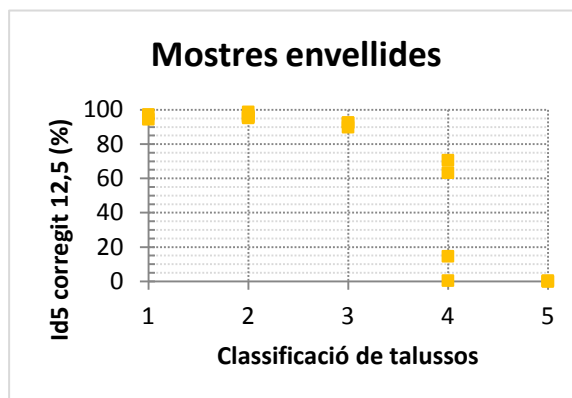
pràcticament 0, mentre que els valors dels tipus 4 formen dos grups diferenciats. Els dos valors menys durables passen de 68,1 i 82,9 fins a 33,1 i 37,8 perdent un 51,4 i un 54,4% respectivament. Els dos valors més durables passen d'un 93,0 i 93,5 fins a un 70,4 i 76,3 perdent un 24,3 i un 18,4%. Així doncs el tipus de talús que presenta major dispersió de resultats per a mostres intactes és el tipus 5, mentre que per a les mostres envellides és clarament el tipus 4. Els altres tres tipus de talussos 1,2 i 3 disminueixen els seus valors d'Id5 però en menor quantitat, amb un màxim d'un 5,3% per a la mostra Tona 1.2 que és tipus 3.

Pel que fa als límits dels intervals dels valors d'Id5 per a cada tipus de talús veiem que la separació entre els talussos tipus 3 i tipus 4 es diferencia molt més que a les mostres intactes, però la separació entre els talussos 1, 2 i 3 no millora.

Per a aquest motiu s'ha corregit l'índex Id5 envellit de la mateixa manera que es va fer amb les mostres intactes. La correcció llavors, ha estat feta mitjançant els sedassos de 2,0mm, 10,0mm, 12,5mm i 20,2 mm UNE. Com en el cas de les mostres intactes la correcció amb el sedàs de 2,0mm pràcticament no canvia la gràfica del Id5 envellit. Aleshores es presenten les gràfiques per a 10,0mm i 12,5mm:



**Gràfica 6-6.** Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 10,0mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres envellides.

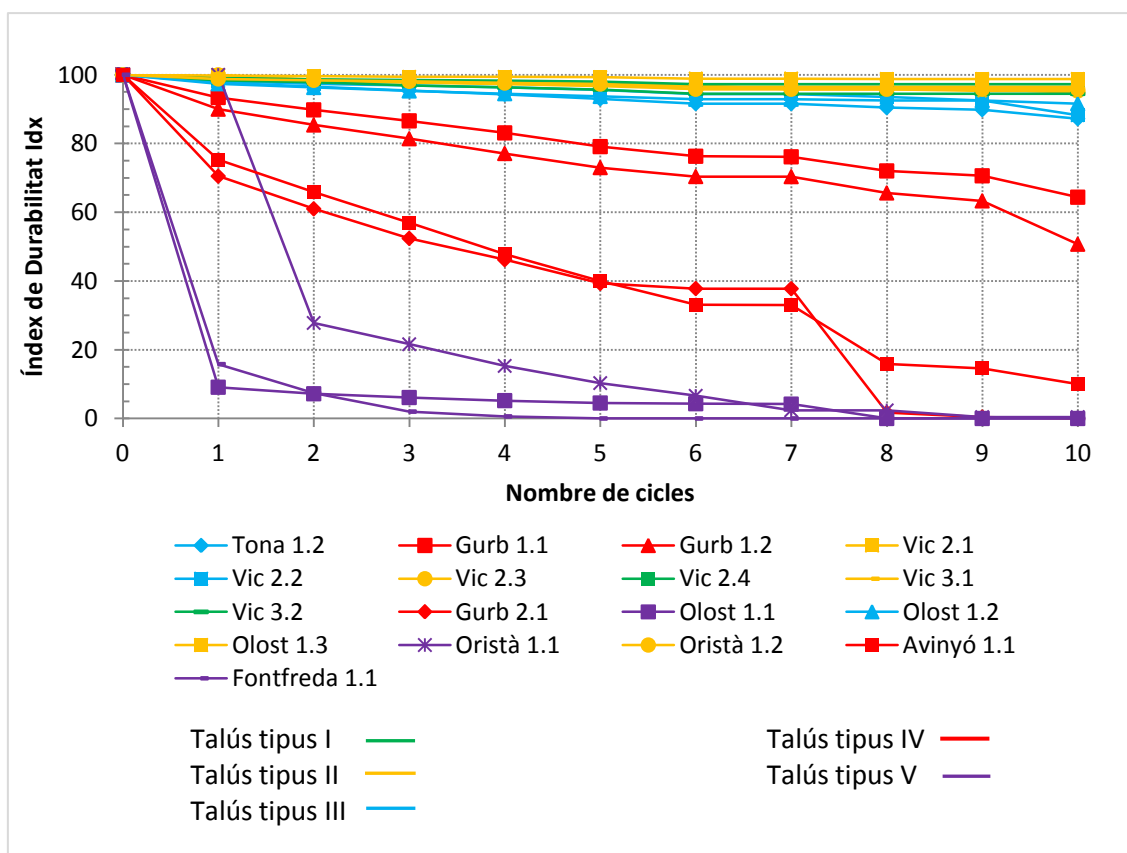


**Gràfica 6-7.** Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 12,5mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres envellides.

Com es veu a les gràfiques, les correccions aporten més informació per a diferenciar entre els talussos tipus 2 i tipus 3, respecte a la gràfica de l'índex Id5 envellit sense corregir. Aquesta informació però, només contribueix amb una petita millora ja que els valors d'Id5 de talussos tipus 3 disminueixen un màxim d'1,9% a la

mostra Vic 2.2 a la correcció de 12,5mm. A més a més, els valors d'Id5 per a talussos tipus 2 també disminueixen, un màxim de 0,5% a la mostra Vic 2.3 per a la mateixa correcció. En quan a les mostres tipus 4 i tipus 5, al treure les fraccions més petites que havien quedat retengudes al tambor del SDT, la durabilitat de les mostres tipus 4 menys resistents baixa fins al 0 pràcticament i per tant es solapen amb les mostres tipus 5. Llavors podem concloure que les correccions amb sedassos de 10,0mm i 12,5mm presenten una petita millora per a distingir els talussos tipus 2 i tipus 3, però aquesta no és una millora essencial.

Seguidament es presentarà la gràfica 6.8 on es representen els valors d'Id5 per a cada un dels cicles d'assaig SDT, l'Id5 envellit i els valors de les diferents correccions realitzades. Per a les correccions de 10,0mm i 12,5 mm s'observa com els talussos tipus 2 i tipus 3 comencen a diferenciar-se, encara que la frontera per a aquests dos intervals és molt subtil (un 2,8% entre les mostres tipus 3 de Vic 2.2 i Olost 1.2 i la mostra tipus 2 Vic 2.3).



**Gràfica 6-8.** Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres envellides, afegint la correcció al valor Id5 respecte a la mostra inicial Id5 envellit (cicle 6), i les correccions per 2,0mm (cicle 7), 10,0mm (cicle 8), 12,5mm (cicle 9) i 20,0mm (cicle 10). Les corbes estan classificades per tipologia de talús.



Així doncs, observant la gràfica anterior es pot comentar que les correccions amb sedassos 10,0mm i 12,5mm confirmen la tendència de separació entre els valors d'Id5 dels talussos tipus 2 i tipus 3.

## 6.2 COMPARACIÓ DE RESULTATS AMB LES MOSTRES PROVINENTS D'EUSKADI

L'objectiu d'aquesta part de l'anàlisi és doble. Primerament es vol comprovar si les conclusions trobades per a les mostres assajades en aquesta tesina són vàlides per a les mostres procedents d'Euskadi incorporades des d'un estudi anterior de Martínez-Bofill (2011). En segon lloc es vol observar si aquestes mostres aporten més informació per tal de diferenciar la tipologia dels talussos. Cal dir que les mostres procedents d'Euskadi varen estar sotmeses als mateixos assajos que les mostres assajades en aquesta tesina i per això la comparació podrà ser efectuada.

### 6.2.1 Anàlisi de la durabilitat per a les mostres intactes d'Euskadi

Per a confrontar els resultats de les diferents mostres, s'han realitzat gràfiques anàlogues a les ja comentades a partir dels resultats de l'índex de durabilitat per a cada cicle de l'assaig SDT i de les correccions efectuades sobre l'Id5 amb els sedassos UNE 2,0mm, 10,0mm, 12,5mm i 20,0 mm.

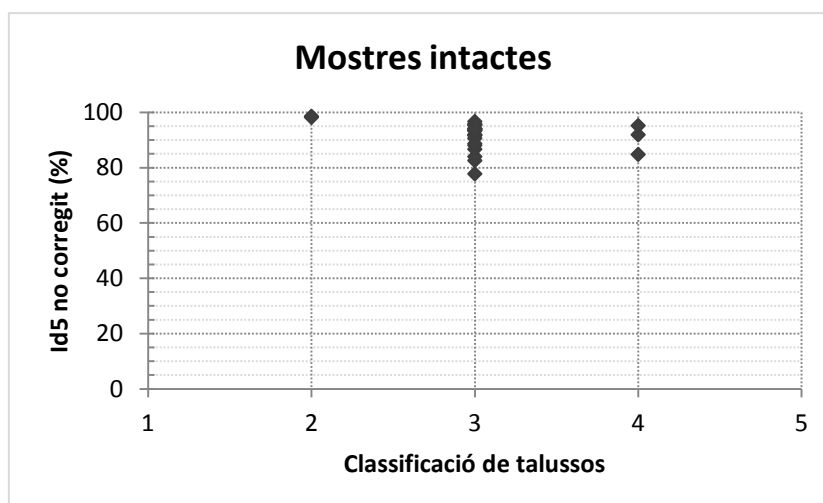
A la taula 6-1 es presenten els valors de l'Id5 i de l'Id5 corregit amb la tipologia del talús corresponent, que s'utilitzaran per a dibuixar les gràfiques. Les correccions amb els sedassos de 2,0mm i 20,0mm no es presenten a la taula, al no ser significatives tal i com s'ha explicat a l'apartat de l'anàlisi per a les mostres assajades en aquesta tesina.

**Taula 6-1.** Valors de durabilitat Id5 per a les mostres intactes d'Euskadi, corregides segons el percentatge de fracció que passa pel sedàs UNE 10,0mm i 12,5mm, amb tipologia de talussos.

MOSTRA	ID5 nc	% pasa sedàs 10,0 mm	% pasa sedàs 12,5 mm	ID5 corregit (10)	ID5 corregit (12,5)	Tipus de talús
IM-2	94,1	6,4	12,5	88,0	82,3	3
IM-3	94,1	7,4	12,3	87,1	82,5	3
IM-5	90,6	15,0	21,3	77,0	71,3	3
IM-6	93,5	1,4	3,2	92,2	90,5	3
IM-8	91,9	8,5	13,3	84,1	79,7	4
IM-9	86,7	15,2	19,1	73,5	70,1	3
IM-11	88,1	9,3	13,3	79,9	76,4	3

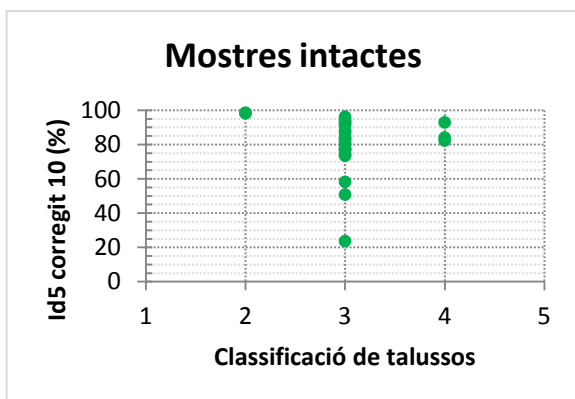
IM-12	91,7	9,2	16,8	83,2	76,3	3
IM-13	77,8	69,6	79,5	23,6	15,9	3
IM-15	96,7	0,5	0,9	96,2	95,8	3
IM-16	95,3	1,2	2,1	94,2	93,3	3
IM-17	98,2	0,0	0,0	98,2	98,2	2
IM-18	84,8	2,9	5,1	82,3	80,5	4
OM-2	82,6	6,7	15,3	77,0	69,9	3
OM-4	95,2	2,4	3,0	92,9	92,3	4
OM-5	84,0	30,7	45,9	58,2	45,5	3
OM-6	95,7	2,4	4,5	93,4	91,4	3
OM-8	93,8	11,9	24,6	82,6	70,7	3
OM-9	93,9	10,1	18,0	84,4	77,0	3
OM-10	88,7	12,4	18,0	77,7	72,7	3
OM-12	95,7	4,6	8,3	91,3	87,8	3
OM-13	92,0	12,0	24,3	80,9	69,6	3
OM-15	91,7	44,6	57,1	50,8	39,3	3
OM-18	98,6	0,0	0,0	98,6	98,6	2
OM-19	93,3	20,6	41,5	74,1	54,6	3

La majoria de les mostres estan classificades com a tipus 3 o de degradabilitat mitjana i localment de tipus 2 (degradabilitat baixa) o tipus 4 (degradabilitat alta). Algunes de les mostres tipus 3 tenen uns valors d'Id5 relativament baixos per a pertànyer a aquesta tipologia, ja que a les mostres procedents dels desmunts de Catalunya hi havia valors d'Id5 semblants però pertanyents a una tipologia 4. Això provocarà que hi hagi una gran dispersió en els valors d'Id5 per a mostres tipus 3, el que dificultarà la separació entre els intervals d'Id5 per a les tipologies de talussos 3 i 4 (gràfica 6-9).

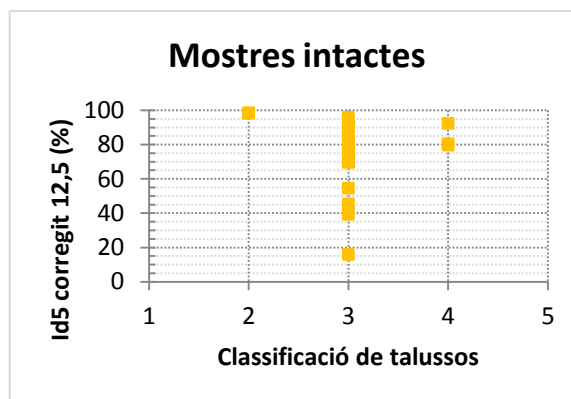


**Gràfica 6-9.** Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos, per a les mostres intactes d'Euskadi.

Tal i com s'ha previst, la gràfica demostra que per a mostres intactes l'Id5 no corregit no és capaç d'ordenar les tipologies de talús 3 i 4. Entre les tipologies 2 i 3 no es produeix solapament però la diferència entre les dues encara que existent, és menuda (1,5%) concretament entre les mostres IM-17 (tipus 2) i IM-15 (tipus 3). No es disposen de mostres tipus 5 i per tant no s'ha pogut comprovar si, tal i com passava a les mostres de Catalunya, l'Id5 per a mostres intactes separa bé les tipologies 4 i 5. Seguidament es presenten les gràfiques de les correccions granulomètriques (gràfica 6-8 i 6-9).



**Gràfica 6-11.** Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 10,0mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres intactes d'Euskadi.

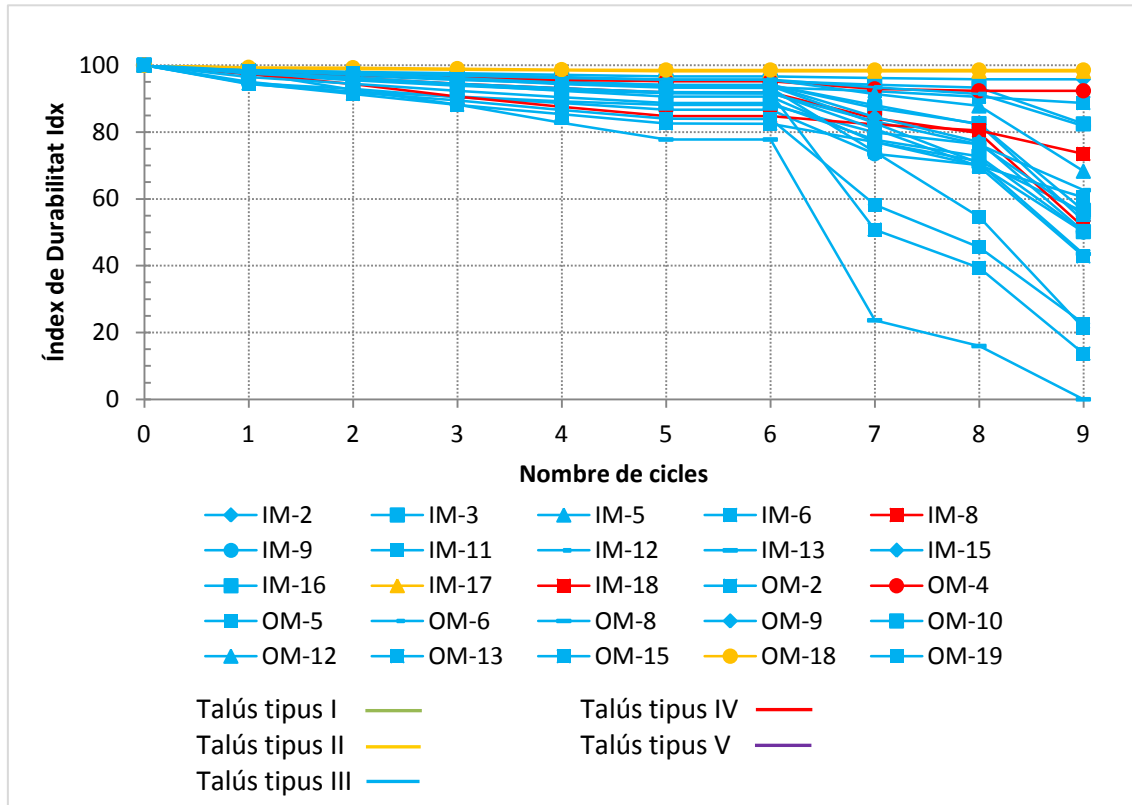


**Gràfica 6-10.** Valors de l'índex Id5 corregit per al sedàs de 12,5mm, respecte a la tipologia de talús a les mostres intactes d'Euskadi.

Es pot observar que els talussos tipus 2 i 3 es separen millor per a la correcció de 12,5mm, encara que sigui amb un 2,4% de diferència només, entre les mateixes mostres IM-15 i IM-17. Així es pot concloure que les mostres amb Id5 major a 95% són tipus 2 (o tipus 1 encara que no es disposi de ninguna) i les mostres menors a 95% són tipus 3 (o tipus 4 o 5).

Les correccions amb el tamís de 10,0mm i 12,5mm UNE provoquen que els valors d'Id5 que baixen més siguin els de la tipologia de talús 3 i no els de la tipologia de talús 4, com era d'esperar. La resposta a aquest fet s'ha de trobar en que l'alteració soferta pels materials no està provocada només per agents físics, ja que la zona de mostreig a prop de les localitats de \_ i \_ , és una zona amb forta activitat tectònica. Llavors la classificació visual realitzada sobre la previsió del comportament dels materials a mitjà i llarg termini, es veu afectada per aquest fet no detectable amb el mètode emprat.

La gràfica 6-10 que s'inclou a continuació, presenta tots els índex de durabilitat per a cadascun dels cicles de SDT així com totes les correccions granulomètriques efectuades, confirmant novament que els talussos tipus 3 i tipus 4 es barregen.



**Gràfica 6-12.** Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres intactes d'Euskadi, afegint la correcció al valor Id5 per 2,0mm (cicle 6), 10,0mm (cicle 7), 12,5mm (cicle 8) i 20,0mm (cicle 9). Les corbes estan classificades per tipologia de talús.

## 6.2.2 Anàlisi de la durabilitat per a les mostres d'Euskadi envellides amb cicles gel-desgel

El procediment emprat per calcular l'índex de durabilitat Id5, l'Id5 envellit i les correccions granulomètriques en aquest apartat és el mateix que s'ha fet servir a la resta de l'anàlisi. Amb l'afegit dels cicles gel-desgel anteriors a sotmetre les mostres a l'SDT, s'esperava que els materials tipus 4 es degradessin més i es pogués arribar a diferenciar entre els talussos tipus 3 i 4 segons el valor de l'Id5, encara que la dispersió en els valors dels talussos tipus 3 per a mostres intactes ho fiqués en dubte. La taula 6-2 mostra les dades de obtingudes per a la correcció de l'Id5 envellit realitzada:

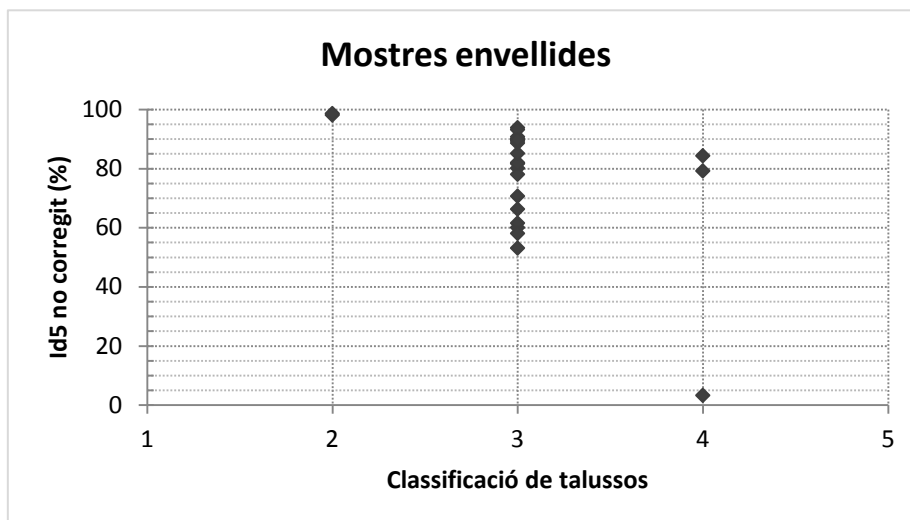
**Taula 6-2.** Valors de durabilitat Id5 per a les mostres envellides d'Euskadi, corregides segons el percentatge de fracció que passa pel sedàs UNE 10,0mm i 12,5mm, amb tipologia de talussos.

MOSTRA	ID5 nc	% pasa sedàs 10,0 mm	% pasa sedàs 12,5 mm	ID5 corregit (10)	ID5 corregit (12,5)	Tipus de talús
IM-2	82,0	16,9	27,4	68,2	59,6	3
IM-3	89,9	6,4	18,3	84,2	73,5	3
IM-5	80,2	39,5	77,5	48,5	18,0	3
IM-6	60,1	3,0	9,8	58,3	54,2	3
IM-8	79,2	13,3	22,0	68,7	61,8	4
IM-9	78,1	7,9	29,7	71,9	54,9	3
IM-11	61,6	43,8	65,3	34,6	21,4	3
IM-12	81,8	15,5	24,3	69,1	61,9	3
IM-13	70,7	83,8	100,0	11,5	0,0	3
IM-15	89,4	4,6	8,0	85,3	82,2	3
IM-16	66,3	23,3	34,2	50,9	43,6	3
IM-17	98,2	0,0	0,0	98,2	98,2	2
IM-18	3,3	100,0	100,0	0,0	0,0	4
OM-2	53,1	24,4	55,7	40,2	23,5	3
OM-4	84,4	54,8	85,0	38,1	12,7	4
OM-5	58,1	45,8	72,3	31,5	16,1	3
OM-6	93,9	12,3	27,6	82,3	68,0	3
OM-8	90,8	26,3	45,7	66,9	49,3	3
OM-9	90,2	11,4	22,2	79,9	70,1	3
OM-10	81,8	11,7	21,6	72,2	64,1	3
OM-12	93,2	13,9	20,2	80,3	74,4	3
OM-13	85,2	9,8	23,6	76,8	65,1	3
OM-15	88,7	24,9	35,2	66,6	57,5	3
OM-18	98,7	0,0	0,0	98,7	98,7	2
OM-19	89,8	28,9	58,1	63,8	37,6	3

De la taula 6-2 es pot despendre que els valors de l'Id5 envellit són òbviament menors els Id5 de les mostres intactes després dels cicles de gel-desgel. Als talussos tipus 2 no disminueix l'índex pràcticament (0,1%) mentre que als tipus 3 la disminució té una mitjana de l'11,7%. Els materials tipus 4 disminueixen una mitjana d'un 35% però aquest decrement ve determinat per una baixada d'un 81,5% a la mostra IM-18, ja que només hi ha 3 mostres tipus 4.

La disminució en el valor de l'Id5 després de corregir-lo amb el sedàs de 10,0mm és de 17,1% de mitjana per als talussos tipus 3 i de 20,0% de mitjana per als talussos tipus 4. Les dos mostres tipus 2 no sofreixen una minva en el seu Id5. Pel que fa a la correcció amb el sedàs 12,5mm les mostres tipus 3 baixen el seu valor d'Id5 en

un 29,5% de mitjana mentre que les tipus 4 un 30,8%. Les tipus 2 no varien l'índex. Seguidament s'analitzarà la gràfica 6-11 dels valors de l'Id5 envellit segons el tipus de talús.

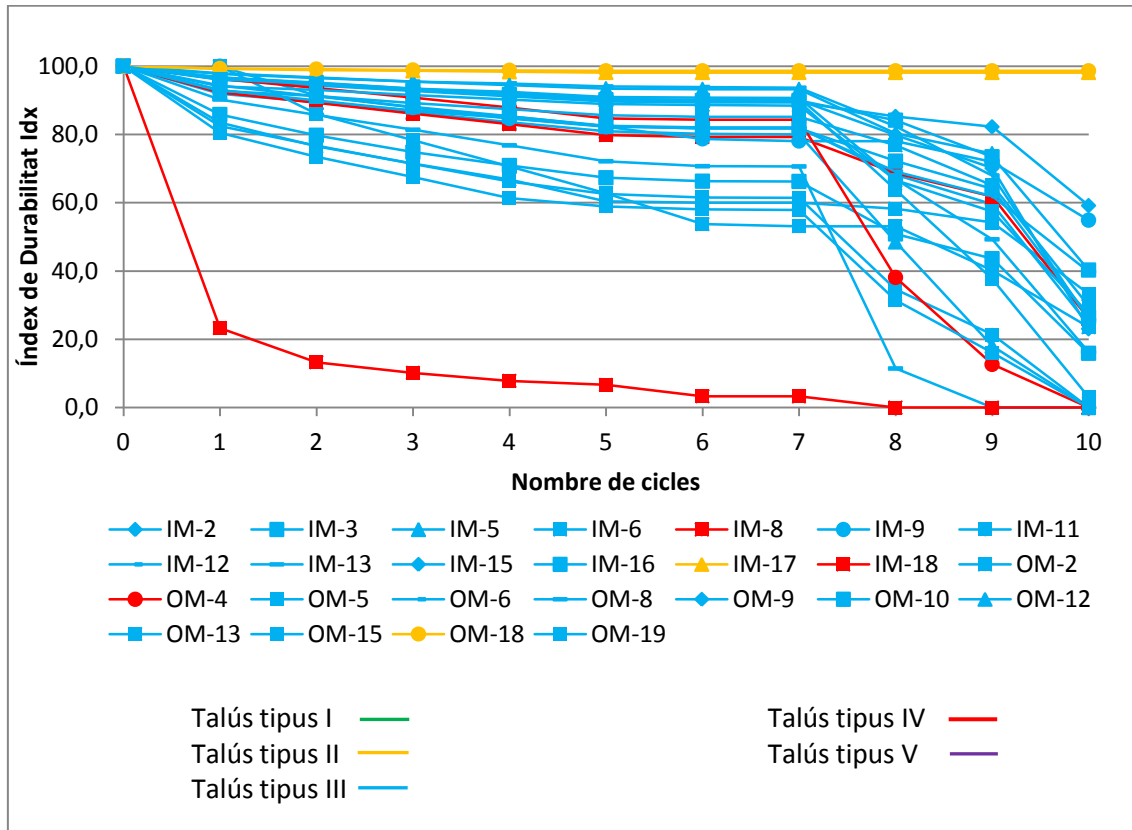


**Gràfica 6-13.** Contrast entre els valors de l'índex de durabilitat Id5 no corregit de l'SDT, respecte la classificació de camp dels talussos, per a les mostres envellides d'Euskadi.

Comparant aquesta gràfica amb l'obtinguda a l'apartat per a mostres intactes observem com les mostres que més disminueixen el valor de l'Id5 són les de tipus 3, exceptuant la mostra IM-18 que és de tipus 4. Cal dir no obstant, que es necessitarien més mostres de tipus 4 per poder generalitzar el seu comportament. Un altre aspecte a destacar és que els talussos tipus 2 i 3 es separen una mica millor amb una diferència d'un 4,3% entre les mostres IM-17 (tipus 2) i OM-6 (tipus 3).

Les gràfiques de l'Id5 corregit per els sedassos de 10,0mm i 12,5mm no s'adjunten per que no proporcionen ninguna informació addicional. A l'igual que a les mostres intactes, en aplicar aquestes dues correccions la tipologia que més disminueix el seu percentatge d'Id5 és la tipus 3. Com ja s'ha comentat abans, les condicions a les que han estat sotmesos els materials poden ser la causa.

Per últim s'afegeix la gràfica 6-12 on es pot observar l'evolució de l'índex de durabilitat tant a l'assaig SDT en els seus diferents cicles com a les correccions realitzades amb posterioritat.



**Gràfica 6-14.** Distribució de les corbes de durabilitat dels cicles de desgast en SDT, per a les mostres envellides d'Euskadi, afegint la correcció al valor Id5 respecte a la mostra inicial Id5 envellit (cicle 6), i les correccions per 2,0mm (cicle 7), 10,0mm (cicle 8), 12,5mm (cicle 9) i 20,0mm (cicle 10). Les corbes estan classificades per tipologia de talús.

S'observa clarament com amb els cicles de gel-desgel i les correccions granulomètriques la separació entre les mostres tipus 2 i 3 es fa més clara.

Per finalitzar l'apartat hem referiré als objectius marcats a l'inici dient que les conclusions obtingudes al assajar i analitzar els resultats per a les mostres provinents de Catalunya no poden ser extrapolades per a les mostres d'Euskadi. Pot ser un problema degut a la singularitat dels materials obtinguts a Guipúscoa per la tectònica de la zona, o pot ser que l'anàlisi sobre l'assaig de durabilitat SDT sense i amb cicles gel-desgel, hagi de realitzar-se en particular per una zona en concret.

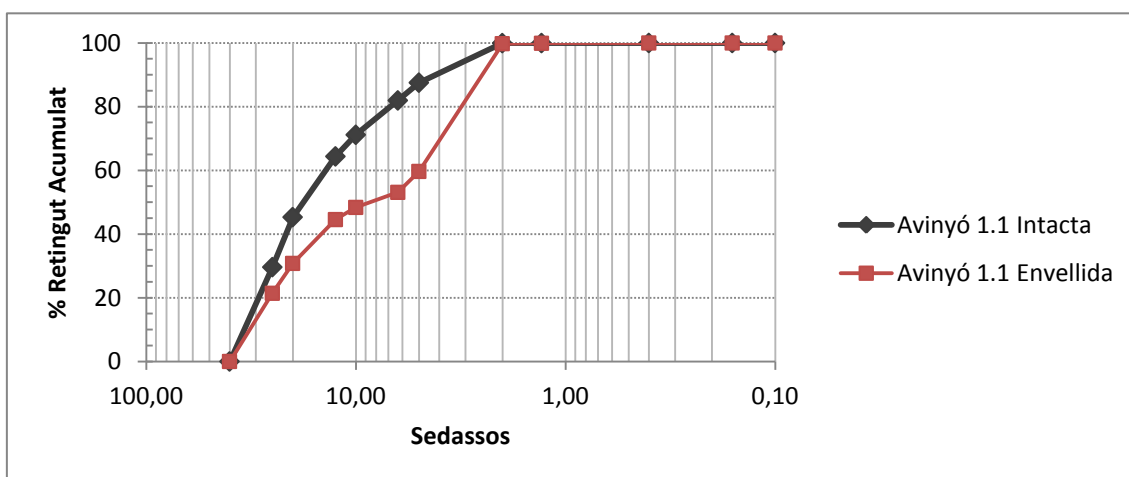
### 6.3 UN ALTRE ÍNDEX QUANTITATIU DE DURABILITAT: EL DESINTEGRATION RATIO

El Desintegration Ratio (DR) que ja s'ha presentat als antecedents, és un índex quantitatiu de durabilitat. L'objectiu d'aquest índex és el mateix que el de les correccions granulomètriques sobre l'Id5 que s'han realitzat en aquesta tesina, i que

s'han analitzat prèviament en aquest apartat, solucionar el problema principal del Slake Durability Test. Les mostres que es trenquen durant l'assaig en trossos més grans que la malla del sedàs 2,0mm pròpia del tambor, fan pujar el valor de l'índex de durabilitat, quan en realitat són fraccions que la roca degradada ja ha perdut.

En aquest cas, l'índex Desintegration Ratio es basa en una granulometria per tamisat de la mostra assajada amb l'SDT, que dóna lloc a una corba del Retingut Acumulat en tant per cent. La relació entre l'àrea sota la corba i l'àrea total que abasta tot el rang de sedassos utilitzats a la granulometria, és l'índex. Una roca amb un DR proper a 1 no demostrarà una alta durabilitat en el camp solament, sinó que a més a més no es desintegrarà en fragments petits. Per tant, el DR pot ser utilitzat de manera quantitativa per descriure la distribució de les grandàries dels fragments del material retingut al tambor de l'SDT.

Així doncs, s'han dibuixat les corbes del retingut acumulat a cada sedàs i s'ha calculat el DR per a cada mostra, tant a les mostres intactes com a les envellides mitjançant el gel-desgel. Com a exemple, a la gràfica 6-13 es veuen les corbes de la mostra Avinyó 1.1:



Gràfica 6-15. Comparació entre les gràfiques del retingut acumulat per a la mostra Avinyó 1.1.

A continuació es presenten els resultats del DR per a cada mostra a la taula 6-3.



**Taula 6-3.** DR calculats per a les mostres intactes i envellides amb tipologia de talús inclosa.

MOSTRA	DR INTACTES	DR GEL-DESGEL	TIPUS DE TALÚS
Tona 1.2	1,00	0,97	3
Gurb 1.1	0,99	0,87	4
Gurb 1.2	0,97	0,83	4
Vic 2.1	1,00	1,00	2
Vic 2.2	1,00	0,97	3
Vic 2.3	1,00	0,99	2
Vic 2.4	1,00	1,00	1
Vic 3.1	1,00	0,99	2
Vic 3.2	0,97	1,00	1
Gurb 2.1	0,90	0,21	4
Olost 1.1	0,86	0,19	5
Olost 1.2	1,00	0,99	3
Olost 1.3	1,00	1,00	2
Oristà 1.1	0,46	0,22	5
Oristà 1.2	1,00	1,00	2
Avinyó 1.1	0,66	0,49	4
Fontfreda 1.1	0,75	0,14	5

Com es veu a la taula 6.3, a les mostres intactes el DR obté valors pròxims a l'1 a totes menys a les tipus 5 i a les tipus 4 més degradables. S'observa a més, que existeix solapament entre la mostra Avinyó 1.1 que és tipus 4 i les mostres tipus 5 Olost 1.1 i Fontfreda 1.1. Si el que es vol és diferenciar els diferents tipus de mostres, el DR per a mostres intactes no aporta informació suficient.

A les mostres envellides, veiem com el solapament entre les tipologies 4 i 5 desapareix. També veiem com les mostres tipus 4 que a les mostres intactes tenien valors propers a l'1, ara han disminuït el seu valor i per tant això pot ajudar a diferenciar les mostres tipus 4 de les mostres tipus 3 amb més claredat.

Així observem com a les mostres envellides l'Id5 per a la correcció de 12,5mm (que és de les correccions considerades la que millor diferència entre les mostres tipus 3 i tipus 4), la mostra tipus 3 amb un índex de durabilitat més baix (Tona 1.2 amb un 89,8%) i la mostra tipus 4 amb un índex més alt (Gurb 1.1 amb un 70,6%), mantenen una diferència d'un 19,2%, mentre que la diferència al DR és d'un 14%. Conseqüentment es pot concloure que el DR proposat per Erguler, Z. A. & Shakoor, A.

(2009), no aporta més informació que les correccions granulomètriques proposades en aquest estudi, almenys per a les mostres aquí assajades i analitzades.

Queda vista llavors l'aplicació del DR per a les mostres procedents de Catalunya i ara es comprovarà si per a les mostres d'Euskadi aporta alguna informació addicional. Els DR calculats es mostren seguidament:

**Taula 6-4.** DR calculats per a les mostres intactes i envellides d'Euskadi, amb tipologia de talús inclosa.

MOSTRA	DR INTACTES	DR GEL-DESGEL	TIPUS DE TALÚS
IM-2	0,78	0,64	3
IM-3	0,80	0,73	3
IM-5	0,75	0,43	3
IM-6	0,97	0,76	3
IM-8	0,78	0,67	4
IM-9	0,77	0,63	3
IM-11	0,77	0,43	3
IM-12	0,79	0,71	3
IM-13	0,30	0,28	3
IM-15	0,99	0,84	3
IM-16	0,91	0,61	3
IM-17	1,00	1,00	2
IM-18	0,92	0,14	4
OM-2	0,82	0,51	3
OM-4	0,96	0,39	4
OM-5	0,56	0,45	3
OM-6	0,92	0,66	3
OM-8	0,72	0,56	3
OM-9	0,76	0,65	3
OM-10	0,75	0,67	3
OM-12	0,87	0,70	3
OM-13	0,71	0,67	3
OM-15	0,50	0,62	3
OM-18	1,00	1,00	2
OM-19	0,60	0,49	3

A les mostres intactes el DR no diferencia entre les mostres tipus 2 (IM-17 i OM-18 amb DR igual a 1) i la mostra tipus 3 amb DR més alt (IM-15 amb DR igual a 0,99). A més a les mostres 3 i 4 es produeix solapament.

A les mostres envellides continua havent solapament entre les mostres tipus 3 i 4, que com ja s'ha explicat possiblement es deu a la tectònica de la zona de mostreig.

En quan a la separació de les mostres tipus 2 i 3, amb el mètode de la correcció granulomètrica proposada a la tesina per al sedàs de 12,5mm, la diferència és de 16,0% (entre la mostra tipus 2 IM-17 i la mostra tipus 3 IM-15). Amb el DR la diferència és de 16,0% igualment, entre les mateixes mostres. Per tant, es demostra també per a les mostres provinents d'Euskadi que el DR no aporta més informació que la correcció granulomètrica proposada per al sedàs de 12,5mm.

## 7 CONCLUSIONS

L'objectiu de la present tesina ha estat la millora de l'assaig de durabilitat Slake Durability Test, i la seva capacitat per a poder predir el comportament en obra a mitjà i llarg termini dels talussos excavats en roques argiloses. Per a aconseguir-lo s'han proposat unes correccions granulomètriques sobre les mostres assajades que permeten millorar la falta de sensibilitat que presenta l'SDT especialment en els materials que són degradables, però no es descomposen en llim i argila. Els índexs de durabilitat obtinguts al laboratori s'han validat amb el comportament dels talussos observats al camp. Les conclusions que s'han extret durant el treball són les següents:

- A l'assaig SDT sobre mostres intactes:
  - ➔ L'índex Sehdude (Id2) no representa de manera adient el comportament de les mostres. El rang de valors obtinguts és massa petit per poder caracteritzar correctament les tipologies dels talussos.
  - ➔ S'observa que la durabilitat de les mostres expressada per l'índex Id5, tendeix a esglaonar-se d'una forma coherent segons quina sigui la tipologia de classificació del talús. Per a valors d'Id5 inferiors al 60% aproximadament les mostres correspondrien a un talús tipus 5, diferenciant-les de les pertanyents a talussos tipus 4.
  - ➔ Per a la resta de mostres assajades, el SDT en mostra intacta no permet discriminar quin serà el comportament del talús.
  - ➔ No s'ha trobat una bona correlació entre les correccions granulomètriques amb els sedassos de 10,0mm i 12,5mm per mostra intacta, i el comportament dels talussos.
  - ➔ Per tant, el SDT sobre mostra intacta no és suficient per a predir quina serà la durabilitat de les roques quan estiguin exposades en obra.
- A l'assaig SDT sobre mostres envellides amb cicles de gel-desgel:

- ➔ L'assaig de durabilitat basat solament en cicles d'envelliment gel-desgel, no és suficient per si mateix per a predir la durabilitat de les roques argiloses alterables.
- ➔ Es deuen corregir els valors de l'índex Id5, per a que es refereixin a la pèrdua de massa de les mostres durant tot el procés de durabilitat complet, i no solament al SDT. Al treball hem anomenat a la correcció, Id5 envellit.
- ➔ L'ús de l'assaig SDT sobre mostra envellida en cicles gel-desgel permet una bona diferenciació entre els talussos de tipus 3 i tipus 4, però no permet una bona separació entre els talussos 1, 2 i 3.
- ➔ Les correccions amb sedassos de 10,0mm i 12,5mm presenten una millora per a distingir els talussos tipus 2 i tipus 3, confirmant la tendència de separació de les dues tipologies. Tanmateix, aquesta no és una millora essencial per a predir-ne el comportament.
- Amb els resultats de les mostres provinents d'Euskadi es pot concloure que:
  - ➔ A les mostres intactes, la separació entre les tipologies 2 i 3 està al voltant del 95% de l'Id5. Les mostres tipus 3 i 4 sofreixen solapament en els valors de l'índex de durabilitat.
  - ➔ A les mostres envellides amb cicles gel-desgel, les correccions granulomètriques permeten que la separació entre les mostres tipus 2 i 3 sigui més clara.
  - ➔ Les conclusions obtingudes a l'assajar i analitzar els resultats per a les mostres provinents de Catalunya no poden ser extrapolades per a les mostres d'Euskadi. S'interpreta que el problema pot ser degut a la singularitat dels materials obtinguts a Guipúscoa, que han estat altament tectonitzats.
- L'índex quantitatiu de durabilitat Desintegration Ratio, Erguler, Z. A. & Shakoor, A. (2009), aplicat a les mostres assajades en aquesta tesina permet concloure que:
  - ➔ Si el que es vol és diferenciar els diferents tipus de mostres, el DR per a mostres intactes no aporta informació suficient. A les mostres envellides, veiem com el

solapament entre les tipologies 4 i 5 que presentaven les mostres intactes, desapareix. Conseqüentment es pot concloure que el DR, no aporta més informació que les correccions granulomètriques proposades en aquest estudi, almenys per a les mostres aquí assajades i analitzades.

- El DR aplicat a les mostres procedents d'Euskadi conclou que:
  - ➔ A les mostres intactes el DR no diferencia entre les mostres tipus 2 i tipus 3. A més a les mostres tipus 3 i 4 es produeix solapament en els valors de l'índex de durabilitat. A les mostres envellides continua havent solapament entre les mostres tipus 3 i 4, i la separació entre les mostres tipus 2 i 3 no millora a la ja obtinguda amb la correcció granulomètrica amb el sedàs de 12,5mm UNE.

Per tant, com a conclusió final, la correcció granulomètrica sobre l'assaig SDT en mostra envellida en gel-desgel millora la discriminació en el comportament observat dels talussos estudiats, i per tant és un criteri a tenir en compte per la predicció del comportament dels talussos a mitjà i llarg termini.

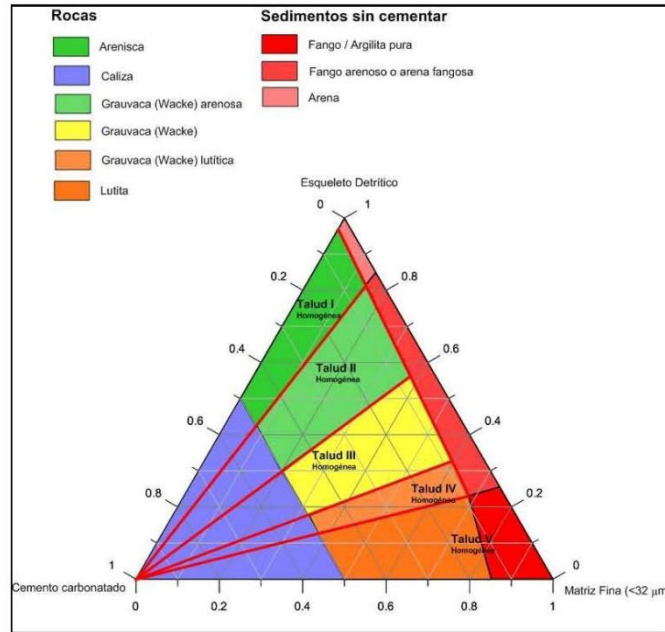
## **8 FUTURES LÍNIES DE RECERCA**

Durant la redacció de la present tesina, han sorgit nous dubtes i s'han obert noves possibilitats d'avançar en la caracterització de les roques argiloses alterables. Per això es plantegen aquí tres possibles millores a aplicar.

En primer lloc, s'ha pensat en una millora per a la granulometria per tamisat realitzada després de l'Slake Durability Test. Hi ha mostres que al degradar-se, es trenquen en fragments en forma de llesques. Aquestes llesques de forma allargada, tenen una dimensió predominant, al contrari que les malles dels sedassos UNE utilitzats, que tenen forma de quadrícula. Així doncs, una granulometria utilitzant els sedassos amb malla formada per barres, típica de l'assaig de l'índex de llesques (en castellà, índice de lajas), caracteritzaria millor la morfologia d'aquest tipus de fragments.

Un altre punt que es pot tractar, és la representativitat dels resultats obtinguts. Estadísticament resultaria adequat ampliar el número de mostres a assajar, ja que els resultats obtinguts donarien més fiabilitat a l'estudi. Per exemple, seria interessant realitzar un mostreig sistemàtic d'uns 10 o 15 talussos per a cadascuna de les 5 tipologies de talussos proposades i veure com evolucionen amb el temps.

Per últim, per a poder discriminar entre les tipologies de talussos 2 i 3 o inclús entre les tipologies 1 i 2, s'ha pensat en la possibilitat d'utilitzar una línia mineralògica. Per a aquest efecte, Martínez-Bofill, J. (2011) proposa una classificació textural dels materials (Figura 8-1), en la que introdueix el ciment com a component fonamental i que permet definir la transició de sediment a roca consolidada.



**Figura 8-1.** Classificació Petroològica-Textural de les Roques Detrítiques Sorrenques i Lutítiques. Martínez-Bofill, J. (2011).

Com s'observa a la figura 8-1, segons el percentatge de ciment i la fracció de sorra o argila, es classifiquen les diferents tipologies de talussos per regions.



## **9 BIBLIOGRAFIA**

1. ASTM C131 (2001) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
2. ASTM C88 (2005) Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.
3. ASTM D4644 (1987) Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks.
4. ASTM D5312-92 (1997) Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Freezing and Thawing Conditions.
5. ASTM D6928-03 (2003) Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus.
6. Czereweko, M.A.; Cripps, J.C. (2001) Assessing the durability of mudrocks using the modified jar slake index test. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology. Geological Society of London. v. 34, nº 2, pp. 153-163.
7. Erguler, Z. A. & Shakoor, A. (2009). Quantification of Fragment Size Distribution of Clay-Bearing Rocks after SDT Testing. Environmental & Engineering Geoscience. Vol. XV, nº 2, pp. 81-89.
8. Franklin JA & Chandra R. (1972) The slake-durability test. International Journal of Mechanics and Mining Sciences. 9. pp. 325-341.
9. Gökçeoğlu, C.; Ulusay, R.; Sönmez, H., (2000). Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. Engineering Geology. 57: 215-237.
10. HNPC (1992). Història Natural dels Països Catalans. Geologia (II). Enciclopedia Catalana. 548 pp.
11. ICC (2002). "Mapa Geològic de Catalunya. Escala 1:250.000" Institut Cartogràfic de Catalunya, DPTOP, Generalitat de Catalunya, Barcelona. Disponible a [www.igc.cat](http://www.igc.cat)
12. ICC (2002). "Mapa Geològic de Catalunya. Escala 1:50.000" Institut Cartogràfic de Catalunya, DPTOP, Generalitat de Catalunya, Barcelona. Disponible a [www.igc.cat](http://www.igc.cat)
13. ICC (2002). "Mapa Topogràfic de Catalunya. Escala 1:500.000" Institut Cartogràfic de Catalunya, DPTOP, Generalitat de Catalunya, Barcelona. Disponible a [www.igc.cat](http://www.igc.cat)
14. IGME (1975). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Puigreig. 331". Instituto Geológico y Minero de España. 22 pp. Madrid.

15. IGME (1983). "Mapa geológico de España. E. 1:50000. Hoja de Vic. 332". Instituto Geológico y Minero de España. 45 pp. Madrid.
16. Koncagül, E.C. & Santi, P. M. (1999) "Predicting the unconfined compressive strength of the Breathitt shale using slake durability, Shore hardness and rock structural properties" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36. pp 139-153.
17. Lienhart, D.A. (1988) The geographic distribution of intensity and frequency of freeze-thaw cycles. Bulletin of the Association of Engineering Geologists. Vol. XXV, nº 4, pp. 465-469.
18. Martinez-Bofill, J. (2011) Criterios para determinar la degradabilidad y durabilidad de las rocas arcillosas y su aplicación en excavaciones y desmontes. Corominas, J.; Soler, A. (directors). Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona.
19. Miscevic, P & Vlastelica, G (2011) Durability characterization of marls from the region of Dalmatia, Croatia. Geotech Geol Eng.
20. NLT-251/91 (1991) Determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blandas.
21. NLT-255/99 (1999) Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de desmoronamiento en agua.
22. Sadisun, I.A. et al (2005) Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. Geotechnical and Geological Engineering. 23. 199-218 pp.
23. SMC (2013) Servei Meteorològic de Catalunya.
24. UNE 103101 (1995) Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
25. UNE EN 1097-1:1997 (1997) Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (micro-deval).
26. UNE EN 1097-2:1997 (1997) Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
27. UNE EN 1367-2:1998 (1998) Ensayos para determinar las propiedades térmicas y de alteración de los áridos. Parte 2: Ensayo de sulfato de magnesio.
28. UNE EN 14066:2003 (2003) Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico.
29. UNE EN 14617-5:2005 (2005) Piedra aglomerada. Métodos de ensayo. Parte 5: Determinación de la resistencia al hielo y al deshielo.